

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SNIŽOVÁNÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT V KLIKOVÉM MECHANISMU

REDUCTION OF CRANKTRAIN MECHANICAL LOSSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN LHOTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL NOVOTNÝ, Ph.D.

BRNO 2009

ABSTRAKT

Snahou bakalářské práce *Snižování mechanických ztrát v klikovém mechanismu* je popsat problematiku snižování mechanických ztrát v klikovém mechanismu spalovacího motoru. Klade si proto za cíl vytvořit přehled hlavních zdrojů mechanických ztrát, ukázat vhodné metody, jakými je lze stanovit, a popsat některé dříve užívané koncepce vedoucí k poklesu ztrát třením. Dále je zaměřena na popis a porovnání v současné době užívaných trendů, kterými je možno do určité míry realizovat řešený problém. Také se snaží hodnotit tyto trendy svým rozbořem dle efektivního a progresivního hlediska a stanovit závěr.

Klíčová slova

klikový mechanismus, hlavní zdroje mechanických ztrát, tření, dynamometr, *PIFFO*, *LINDA*, moderní trendy, nano-kompozitní povlak

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis *Reduction of cranktrain mechanical losses* is to describe the issue of lowering mechanical losses occurring in the crank mechanism of internal-combustion engine. Therefore it aims to create a list of mechanical losses main sources, to show suitable methods to determine them, and to describe some of earlier used concepts leading to reduction of friction losses. Further, it is focused on the description and comparison of existing trends by which the given problem can be solved to a certain extent. The thesis also tries to evaluate these trends by an analysis following the standpoint of effectiveness and progressiveness, and to formulate a conclusion.

Keywords

cranktrain, main sources of mechanical losses, friction, dynamometer, *PIFFO*, *LINDA*, present-day trends, nano-composite coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LHOTA, M. *Snižování mechanických ztrát v klikovém mechanismu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Snižování mechanických ztrát v klikovém mechanismu* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	12
1 Formulace problému a řešené cíle	13
2 Klikový mechanismus	14
2.1 Kliková hřídel	14
2.2 Ojnice	15
2.3 Píst s příslušenstvím	16
3 Hlavní zdroje mechanických ztrát	17
3.1 Problém je tření	17
3.2 Tření v ložiskách	18
3.3 Dříve užívané koncepce u závodních motorů	19
3.3.1 Cesta k redukci ztrát v uložení klikové hřídele a ojnice	19
3.3.2 Ztráty vířením oleje a vzduchu	23
4 Metody pro stanovení mechanických ztrát	25
4.1 Měření za pomoci dynamometru	25
4.2 Speciální měřicí systémy <i>FEV</i>	27
4.2.1 Měřicí systém <i>PIFFO</i>	28
4.2.2 Měřicí systém <i>LINDA</i>	29
5 Moderní trendy při snižování mechanických ztrát	31
5.1 Redukce hmotnosti pístu a ojnice	31
5.2 Snižování počtu ložisek u řadového čtyřválce	32
5.3 Využití pokrokových tribologických povlaků	32
5.3.1 Snižování ztrát třením ošetřením povrchu	33
5.3.2 Výroba povlaků	33
5.3.3 Vložka válce – píst – pístní kroužky	37
5.3.4 Nano-kompozitní povlak je cestou ke snížení opotřebení a tření ..	37
5.3.5 Provedení tribologických povlaků <i>MoN-Ag</i> a <i>MoN-Cu</i>	38
5.4 Efektivní způsob snížení spotřeby paliva ve spalovacích motorech	42
6 Závěr	44
7 Seznam použitých zdrojů	45
8 Seznam obrázků	47
9 Seznam tabulek	49
10 Seznam příloh	50

ÚVOD

Klikový mechanismus se svým významem stal jedním z nejdůležitějších mechanismů ve strojírenství. Zajišťuje svým uspořádáním kinematický převod přímočarého vratného pohybu pístu na pohyb rotační [2].

Svým principem tak stále nachází široké uplatnění zejména u čtyřtákních spalovacích motorů, ale i u motorů dvoutákních nebo také u pístových kompresorů a pístových čerpadel, případně jiných zařízení - např. *Stirlingův* motor.

Poohlédneme-li se kolem sebe, tak zjistíme, že stále nacházíme nejširší využití klikového mechanismu v automobilní, letecké, vlakové a lodní dopravě, tedy u pohonu dopravních prostředků a to hlavně z důvodu přetrvání vývoje spalovacích motorů dodnes. Další využití je možné naléznout v současné době také u zahradní a lesní techniky (travní sekačky a zahradní traktory, pily atd.), kde se používají jak dvoutákní, tak i čtyřtákní spalovací motory.

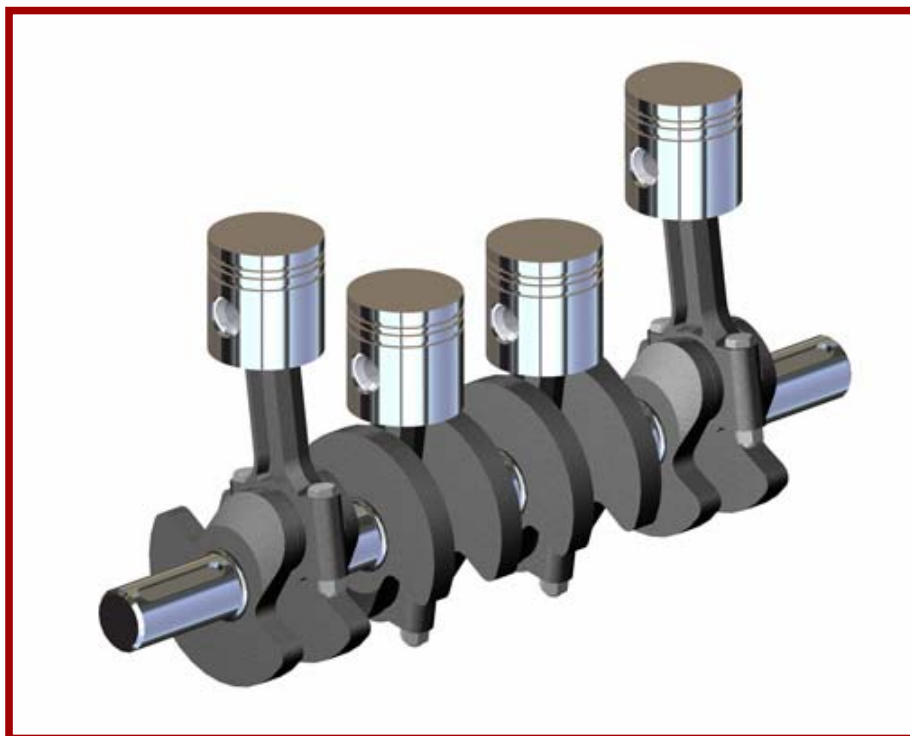
1 FORMULACE PROBLÉMU A ŘEŠENÉ CÍLE

1

Práce si klade za cíl zmapovat hlavní zdroje mechanických ztrát v klikovém mechanismu spalovacího motoru za pomoci teoretického rozboru a současně popsat vhodné metody, jimiž lze tyto ztráty stanovit. Samotnému řešení pro lepší orientaci předchází stručný popis jednotlivých součástí, které tvoří zmíněný mechanismus. Navazující část je pak věnována zevrubné analýze trendů, které přispívají ke snižování mechanických ztrát v současné době. Je zapotřebí vzít na vědomí, že práce se soustřeďuje pouze na klikový mechanismus čtyřdobého spalovacího motoru a je také dle zadání koncipována na rešeršní charakter, proto se věnuje pouze teoretickému popisu stávajících řešení této problematiky. Tedy cílem tohoto projektu je vypracování následujících bodů.

- ◆ Vytvoření přehledu hlavních zdrojů mechanických ztrát.
- ◆ Popis metod pro stanovení mechanických ztrát.
- ◆ Detailní popis moderních trendů při snižování mechanických ztrát.
- ◆ Stanovení závěru.

Názorný příklad klikového mechanismu čtyřdobého spalovacího motoru viz obr. 1.

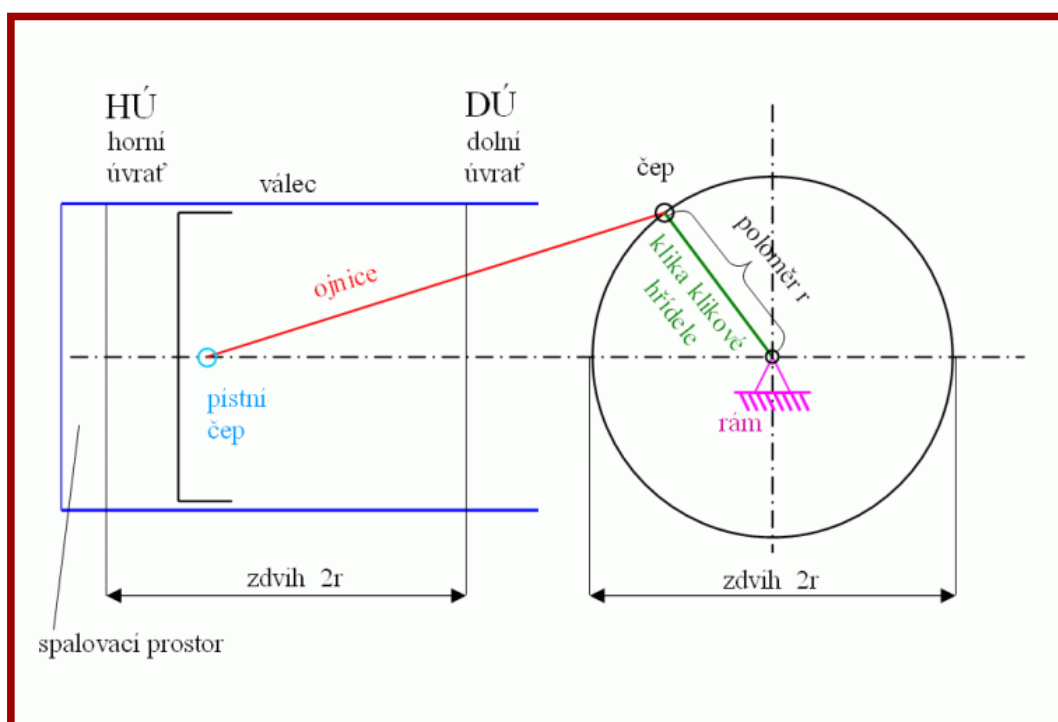


Obr. 1 Běžné konstrukční uspořádání klikového mechanismu současné doby pro motor se čtyřmi válci v řadě [3]

2 KLIKOVÝ MECHANISMUS

Za klikový mechanismus obecně považujeme uspořádání klikové hřídele, ojnice a pístu. K jeho úplnosti pak také ještě patří neodmyslitelné součásti tzv. příslušenství pístu – jedná se o pístní čep a pístní kroužky. Tento soubor součástí tak představuje klikový mechanismus např. spalovacího motoru o jednom válci. Jelikož pro jeden válec jsou vždy jen jedna ojnice a jeden píst s příslušenstvím. Lze tedy říci, že u víceválcového motoru odpovídá počet ojníc a pístů s příslušenstvím počtu válců [4].

Takovéto mechanismy převádí translační (posuvný) vratný pohyb pístu na otáčivý pohyb klikové hřídele prostřednictvím ojnice nebo naopak. Velmi schématicky je pak zobrazen klikový mechanismus na obr. 2.



Obr. 2 Základní schéma klikového mechanismu pro jednoválcovou soustavu [4]

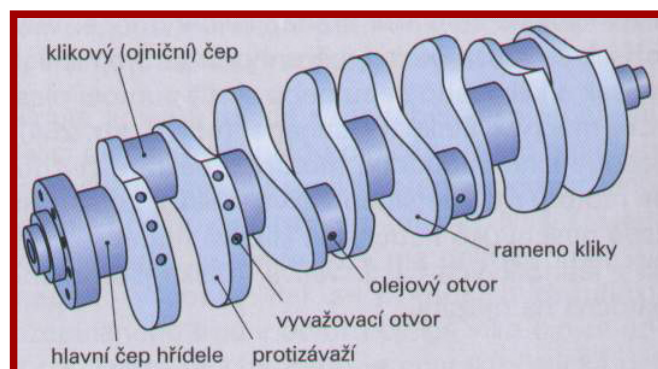
2.1 Kliková hřídel

Vlastní “kliková hřídel viz. obr. 2.1 pístového spalovacího motoru zabezpečuje spolu s ojnici kinematický převod přímočarého vratného pohybu pístu na pohyb rotační” [2]. Pohyb hřídele je otáčivý kolem vlastní osy.

Skládá se z hlavních čepů umístěných v její ose otáčení, čepů klikových respektive ojnících, které jsou vůči této ose vyoseny, a klikových ramen, spojující obě skupiny čepů. Důležitou součástí ramen jsou protizávaží. Obvyklé doplňující prvky jako jsou olejové a vyvažovací otvory nebo příruba pro uchycení setrvačníku je také možné vidět na obr. 2.1.

Hlavní čepy slouží pro uložení klikové hřídele do rámu soustavy (skříně motoru) a klikové čepy pro uložení ojníc. Tato uložení se zprostředkují příslušnými ložisky. Protizávaží, která se nachází naproti klikovým čepům, dynamicky částečně vyvažují setrvačné síly a momenty posuvných a rotujících hmot [2].

Z hlediska výroby může být kliková hřídel dělená, kovaná a nebo litá, ve výjimečných případech i svařovaná.



Obr. 2.1 Kliková hřídel a její části [5]

2.2 Ojnice

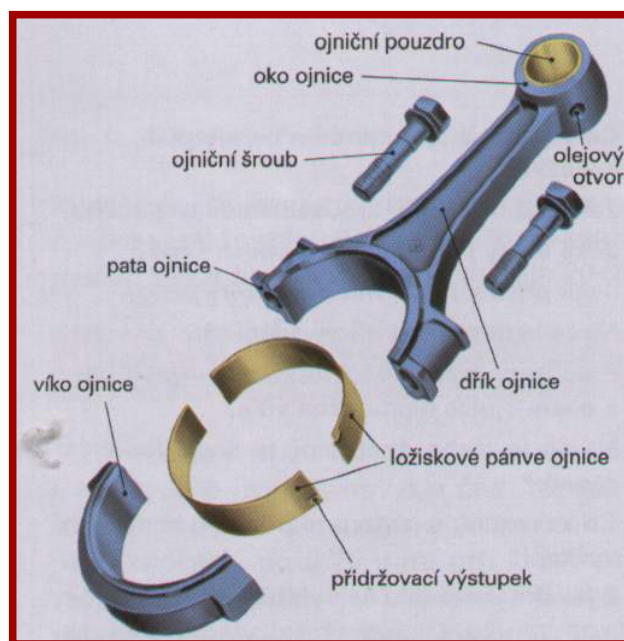
2.2

“Ojnice viz. obr. 2.2 zabezpečuje přenos sil mezi pístem a klikovou hřídelí motoru“ [2]. Její pohyb lze klasifikovat za obecný rovinný.

Ve své podstatě ji tvoří horní a spodní oko. Ta jsou spojena dříkem. Způsoby provedení ojnice spolu s dalšími částmi či prvky se ovšem velmi různí.

Horní oko slouží pro uložení pístního čepu s pístem a spodní pro uložení ojnice s klikovým čepem klikové hřídele. Jak již bylo v předešlé podkapitole řečeno, uložení se realizují za pomoci ložisek. U převážné většiny všech čtyřdobých motorů se spodní oko ojnice dělí na dvě části, protože klikový hřídel čtyřdobých motorů bývá vykován nebo odlit vcelku [2] a ojnici by tedy nešlo uložit. Obě části jsou pak pevně spojeny dvěma ojničními šrouby. V takovém případě se jedná o ojnici dělenou, kterou také vidíme i se všemi dalšími částmi a prvky na obr. 2.2.

Ojnice se vyrábí jako litá a nebo kovaná.



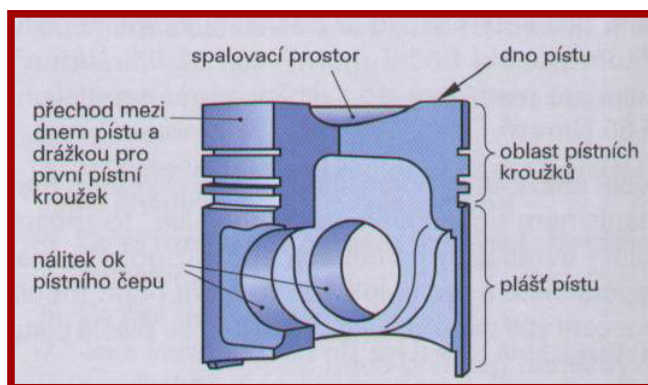
Obr. 2.2 Ojnice a její části [5]

2.3 Píst s příslušenstvím

Účelem pístu na obr. 2.3.1 ve spalovacích motorech je zprostředkovat opakující se cyklus, složený z pracovních fází. V průběhu fáze sání pracovní látku nasává do válce, ve fázi komprese ji uvnitř válce stlačuje. Při fázi expanze přenáší tlak v podobě silového zatížení od rozpínající se látky ve válci ke klikovému hřídeli přes ojnici. Tento přenos způsobuje transformaci přímočarého pohybu na pohyb rotační. V závěru cyklu ve fázi výfuk z válce vytlačuje spaliny. Samotný píst koná přímočarý vratný pohyb.

Pístem je zjednodušeně řečeno dutá válcová nádoba složená ze dna a pláště. Dno je většinou upraveno tvarem spalovacího prostoru. Plášť obsahuje drážky pro pístní kroužky a také jeden pár ok pro uložení pístního čepu. Tyto a další prvky jsou zakresleny na obr. 2.3.1.

Dle výrobního provedení je jako výkovek a nebo odlitek. Může však být zhotoven i jako obrobek, ale v takovém provedení se často neužívá, pouze u kusové výroby.



Obr. 2.3.1 Čtvrtinový řez pístem [5]

Za příslušenství pístu viz obr. 2.3.2 se považuje pístní čep, dva pojistné kroužky, které zajišťují jeho axiální polohu v pístu, a obvykle tři kroužky pístní (dva těsnící a jeden stírací).



Obr. 2.3.2 Píst s příslušenstvím [6]

3 HLAVNÍ ZDROJE MECHANICKÝCH ZTRÁT

3

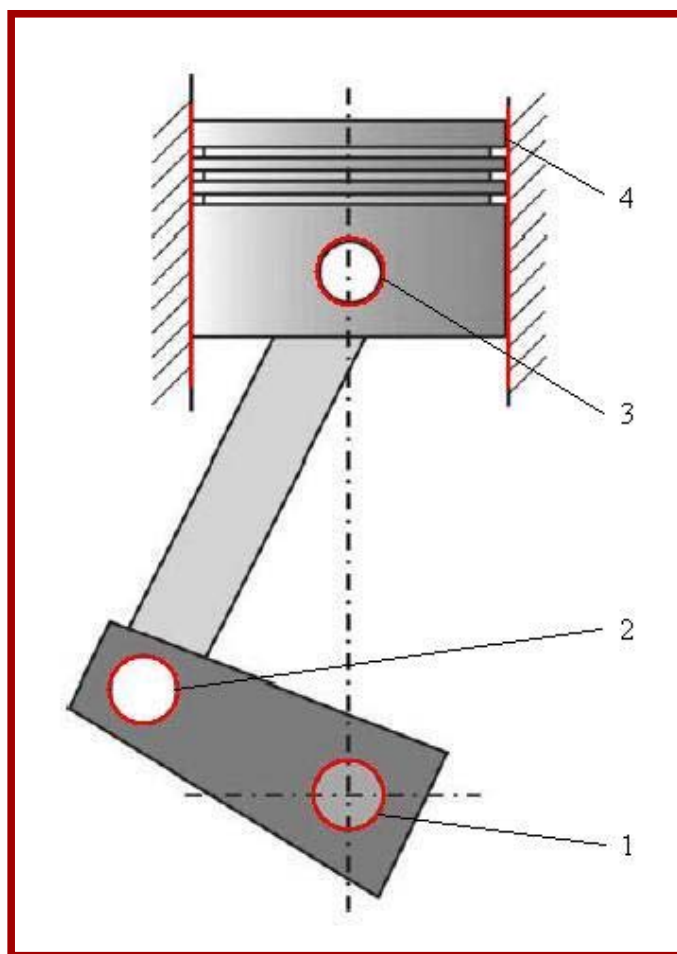
3.1 Problém je tření

3.1

Je známo, že tření *“vzniká při pohybu tělesa v těsném kontaktu s jiným tělesem”* [7]. V klikovém mechanismu nacházíme spoustu takovýchto kontaktů i s odpory prostředí a proto se této problematice věnuje velká pozornost výrobců spalovacích motorů. Jelikož minimalizování tření respektive snížení součinitele tření (*COF*) znamená krom úspory energie i zlepšení mechanické účinnosti a výkonu, spolehlivosti a trvanlivosti. O tomto bude více hovořeno v některé z následujících kapitol.

Ví se také, že tření smykové je méně žádoucí než tření valivé. Proto, kde to jde, je snaha nahrazovat smykové tření valivým.

V tomto projektu se soustřeďuje pozornost pouze na tu část spalovacího motoru, kde se mechanické ztráty způsobují hlavně třením v kontaktních oblastech jednotlivých součástí klikového mechanismu, popřípadě odpory prostředí. Neřeší proto ztráty u dalších nezbytných mechanismů, tvořící čtyřdobý spalovací motor, jsou to např. rozvody a jiné záležitosti. Zmíněné oblasti jsou na schématickém obr. 3.1.1 jednoduše znázorněny čarami červené barvy a stručně popsány v legendě.

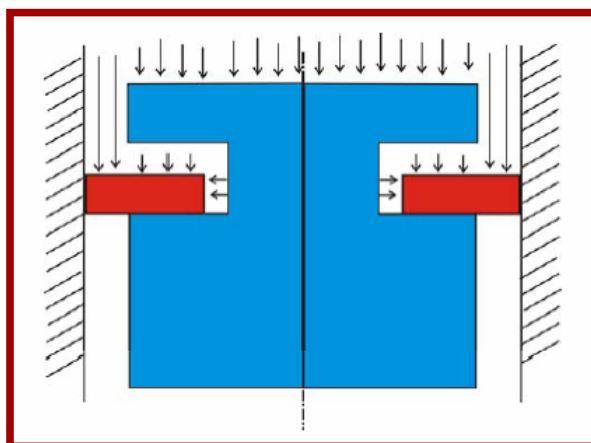


Obr. 3.1.1 Znázornění oblastí hlavních zdrojů mechanických ztrát v klikovém mechanismu [8]

Legenda k obr. 3.1.1

- 1, 2 a 3 – válcové plochy uložení částí klikového mechanismu; oblasti, kde dochází ke ztrátám zejména v kontaktech čepu s ložiskem při nestabilitě mazání
- 4 – válcová plocha o výšce rovné zdvihu pístu; nejvýznamnější oblast z hlediska ztrát způsobena silovým kontaktem pístních kroužků a kontaktem pístu se stěnou válce

Největší podíl ztrát je tedy působen v oblasti pohybu pístu ve válci. Je to dáno růstem tlaku ve válci, přičemž se zvýší i tlak, “který vnikne do prostoru pod prvním pístním kroužkem a přitlačí ho ke stěně válce“, jak ukazuje obr. 3.1.2. “Druhý kroužek má tento tlak již asi třetinový a třetí je jen vlastní pružností přitlačován ke stěně válce a tak jeho ztráty nejsou vysoké.” Tento průběh může ovlivnit i velikost kompresního poměru. Co se pístu týče, ten “je při svém pohybu přitlačován pohybem ojnice ke stěně válce“ a tlakem plynů ve válci [9].



Obr. 3.1.2 Vektorové působení tlaku plynů na píst a pístní kroužek znázorněné v řezu [8]

3.2 Tření v ložiskách

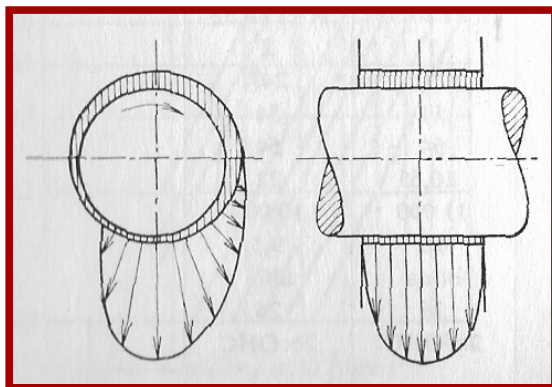
Značné procento celkových ztrát tvoří ztráty třením v ložiskách. Proto je snahou toto tření snižovat. Jak již bylo zmíněno, kde je to možné, užívá se valivých ložisek. Uložení valivými ložisky je výhodné i tam, kde se koná kývavý pohyb, “při kterém se nemůže v kluzném ložisku vytvořit hydrodynamický film“. Jsou to např. pístní čepy, ale i jiná příslušenství [1].

Uložení klikových hřídelů valivými ložisky bylo v minulosti obtížné. K tomuto bude více řečeno později. Nicméně současnost již tento problém řeší a dovoluje tak valivá uložení. I o tomto však bude hovořeno v popisu zabývajícím se moderními trendy této oblasti.

Kluzná ložiska s vícevrstvou výstelkou, které dosahují v současné době velké dokonalosti, je stále možné s úspěchem používat pro uložení klikových hřídelů [1].

Hydrodynamický tlak, vznikající při otáčení klikové hřídele v kluzném ložisku v mazací vrstvě mezi kluznými plochami, zabraňuje přímému styku těchto ploch.

Vzniká vlivem vystředěné polohy čepu. Na obr. 3.2 je zobrazen jeho průběh v hydrodynamickém klínu a poloha čepu v ložisku. Tlak poklesne na nulu ve směru otáčení za nejmenší vůlí v ložisku. Ke krajům ložiska se také zmenšuje maximální tlak. Pokles hydrodynamického tlaku a unikání oleje by mohla způsobit mazací drážka v nosné části ložiskové pánve. Proto je nežádoucí a v této části se nezhotovuje. *“Tlak oleje v mazací vrstvě je mnohem vyšší než přírodní tlak mazacího oleje a musí být vyšší než měrný tlak v ložisku, aby nevznikl kovový styk čepu s výstelkou ložiska“* [1].



Obr. 3.2 Průběh tlaku v mazací vrstvě v ložisku při otáčejícím se hřídeli [1]

Třecí síla v ložisku s hydrodynamický mazáním je závislá na celkové ploše ložiska, dynamické viskozitě oleje, otáčkách a je nepřímo úměrná síle mazací vrstvy (tj. vůli v ložisku). Nevýhodný je tedy velký počet ložisek s velkou plochou. Naopak výhodné jsou ložiska s malou plochou a malou třecí rychlostí. Ovšem plocha ložiska musí být dostatečně velká pro zachycení vysokých tlaků při zatížení. Kvalitními výstelkami, tvrdými a přesně opracovanými čepy se dopomáhá ke splnění požadavků malé ložiskové plochy. *“Pro využití vysokých měrných tlaků v ložisku je nutné, aby nenastalo místní zvýšení měrných tlaků deformací čepu nebo ložiska.“* Pak je možno použití malého průměru čepu, dávající malý třecí moment [1].

3.3 Dříve užívané koncepce u závodních motorů

3.3

3.3.1 Cesta k redukci ztrát v uložení klikové hřídele a ojnice

3.3.1

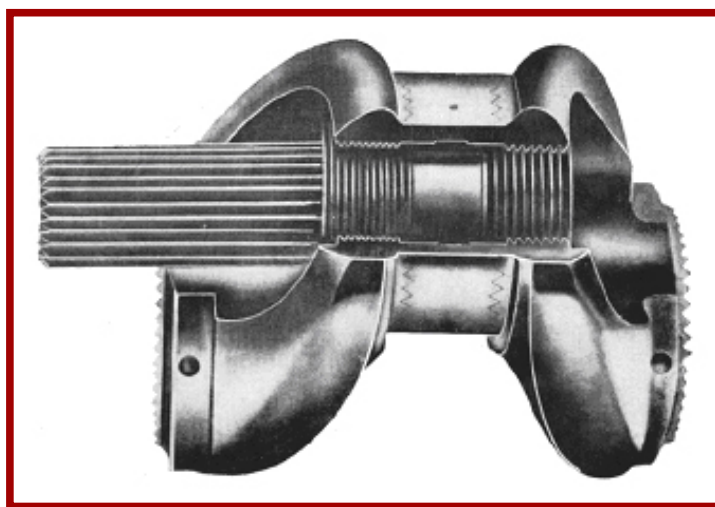
Kliková hřídel spalovacího motoru je velmi namáhanou součástí a proto je zapotřebí, aby se mu věnovala náležitá pozornost. Vzhledem k jeho vysokým provozním otáčkám je vyžadováno kvalitního materiálu a přesného opracování. Dále je zapotřebí věnovat velkou pozornost torzním a ohybovým kmitům klikové hřídele. Proto má být krátká a tuhá s malým počtem zalomení, což vede k dosažení vysoké frekvence vlastních torzních kmitů [1].

Na průměry hlavních a ojnicích čepů jsou kladeny protichůdné požadavky. Pro dosažení torzní tuhosti je žádoucí velký průměr čepů, neboť ji podstatně zvyšuje. Na druhé straně je velký průměr čepů nevýhodný, jelikož tření v ložiskách působí na velkém rameni a tedy třecí moment je velký. Při omezené délce ložisek malý průměr čepu zajišťuje jejich malou plochu a měrné tlaky v ložisku jsou velké. To si vyžaduje

kvalitní materiál výstelky, tuhé ložisko nepodléhající deformacím a tvrdý, přesně opracovaný čep [1].

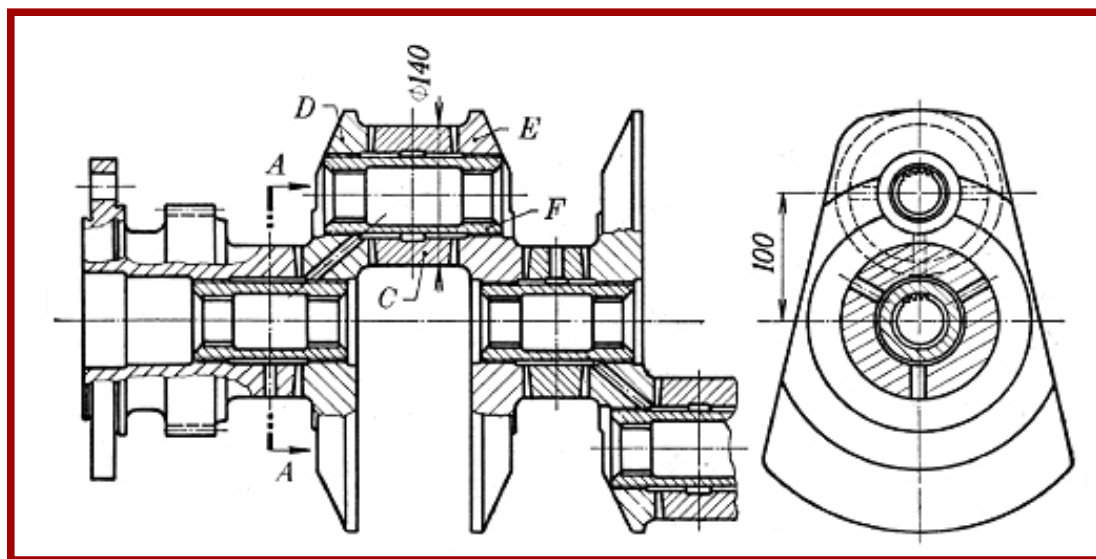
“Uložení rychloběžné klikové hřídele bylo u závodních vozů velký problém. Snahou výrobců závodních spalovacích motorů bylo už v letech 1920 až 1930 klikovou hřídel uložit valivě,” zejména pokud nebyla k dispozici kvalitní vícevrstvá kluzná ložiska. Proto se často užívalo u závodních vozů valivého uložení, které snižuje ztráty třením a není příliš poruchové, když selže mazání [1].

Valivé uložení si vyžadovalo dělenou klikovou hřídel, což vedlo ke značnému navýšení výrobních nákladů. Pro tento způsob se nejčastěji používalo ke spojení jednotlivých dílů klikové hřídele čelní ozubení *Hirth* [1] na obr. 3.3.1a.

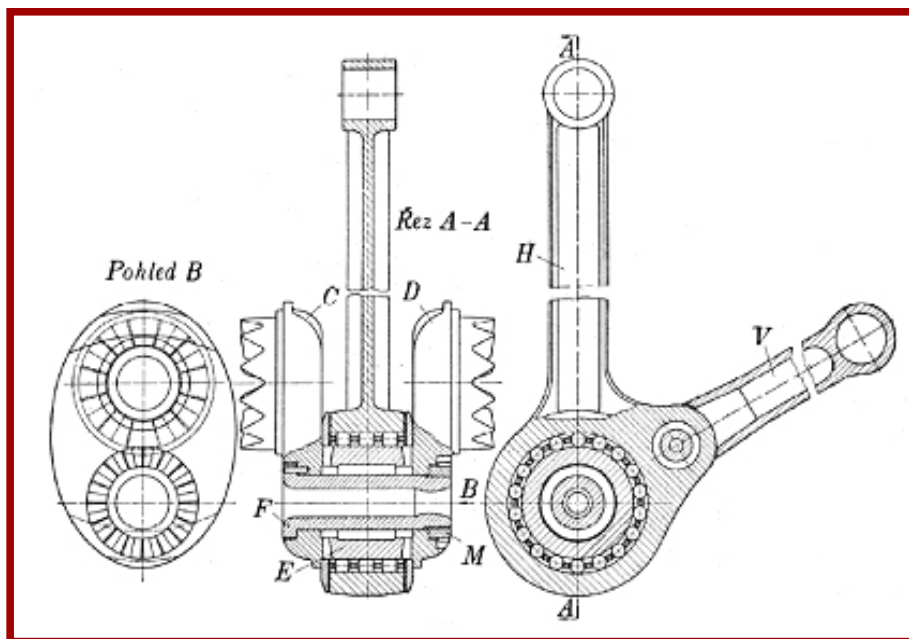


Obr. 3.3.1a *Hirthova spojka s čelním ozubením* [10]

Aplikaci *Hirthova* ozubení nebo tzv. pevné *Hirthovy* spojky na dělenou klikovou hřídel pro uspořádání válců do řady a do “V” ukazují obr. 3.3.1b a obr. 3.3.1c.

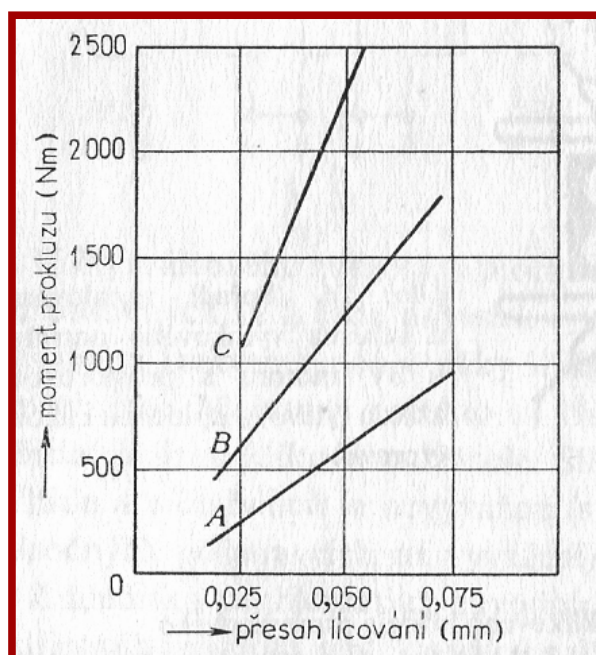


Obr. 3.3.1b Použití *Hirthovy* spojky s čelním ozubením pro spojení částí dělené klikové hřídele pro uspořádání válců do řady [10]



Obr. 3.3.1c Použití Hirthovy spojky s čelním ozubením pro spojení částí dělené klikové hřídele pro uspořádání válců do “V” [10]

“Při lisování čepů, běžném např. u motocyklových motorů je snaha lisovat jen čepy ojnicní, které nepřenášejí plný točivý moment. Zajímavé poznatky získali při lisování čepů pracovníci firmy Honda.” Ti zjistili, že součinitel tření mezi čepem a otvorem se dá zvýšit pokovením obou ploch materiálem s velkým součinitelem tření, např. mědí. Výsledky měření uvádí obr. 3.3.1d. Velikost momentu prokluzu roste přímo úměrně s přesahem. V případě A se jedná o zalisovaný čep bez pokoveného povrchu, v případě B je čep i otvor poměděný a v případě C jsou poměry jako v případě A, ale délka čepu je dvojnásobná [1].



Obr. 3.3.1d Vliv přesahu lisování na moment prokluzu u čepu (Honda) [1]

Legenda k obr. 3.3.1d

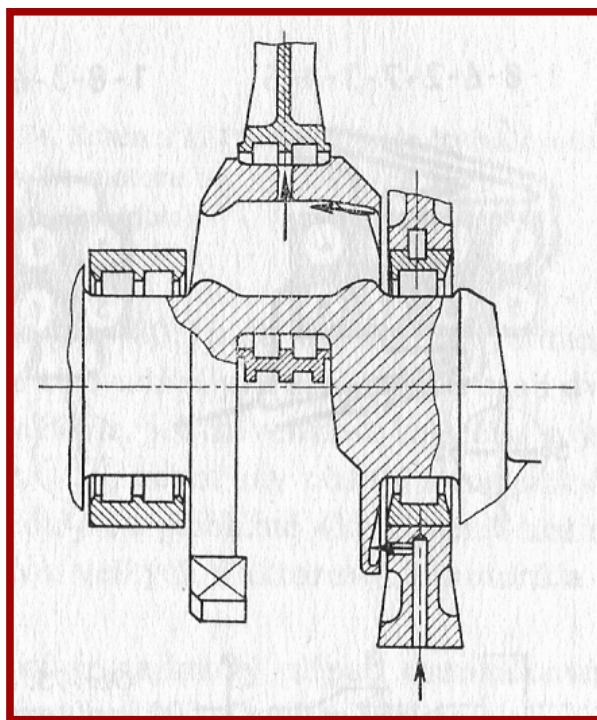
A – povrch bez pokovování

B – čep i otvor poměděný

C – jako A, ale dvojnásobná délka

Opatřením čepu jemným ozubením bylo dosaženo dalšího zlepšení. Také otvor se může, ale nemusí opatřit tímto ozubením. Pro potřebný moment tyto způsoby umožňují zmenšit přesah lisování velkých čepů a tím dosáhnout větší rozměrové přesnosti [1].

Odlišný způsob užívá nedělenou klikovou hřídel a děleného vnějšího kroužku ložiska. Válečky se pohybují u ojnic přímo po vnitřním vrtání dělené ojnice. Rovina dělení může být zazubena. Příklad takového provedení u motoru *Mercedes-Benz W 125* je na obr. 3.3.1f. Vnější kroužky válečkových ložisek a oka ojnice jsou děleny. Dobře je vidět i přívod oleje pro mazání ojničních ložisek [1].



Obr. 3.3.1f Kliková hřídel motoru *Mercedes-Benz W 125* [1]

“Mazání valivých ložisek, zejména ojničních, je obtížné. Olej se k ojničním ložiskům přivádí ze sběrného kroužku v ramenech klikové hřídele, ze kterého se vede do dutého ojničního čepu a dále vyvrtaným kanálem mezi obě řady válečků. Do sběrného kroužku se olej stříká z otvorů ve spodním víku hlavních ložisek“ (obr. 3.3.1f) [1].

U dvanáctiválcového motoru *Ferrari* bylo použito kompromisního řešení. Aby se kliková hřídel nemusela dělit, byly vnitřní dvě ložiska kluzná, a jimi se přiváděl olej ke kluzným ložiskům ojničním. Krajní dvě ložiska byly valivá [1].

Při kluzném uložení klikových hřídelů se používají převážně tenkostěnná vícevrstevná ložiska. “Vlastní pánev je ocelová a na ní je vrstva olovnatého bronzu

nebo hliníkové kompozice, silná jen několik desetin milimetru. Na povrch ložiska se dává ještě slabá vrstva olova, india apod., silná jen 0,02 mm. Taková ložiska snesou měrné tlaky 25 až 35 MPa“ [1].

Dobré kluzné vlastnosti mají hliníková ložiska. Užívá se buď ložisek plných, nebo ložisek na ocelové pánvi. Výhodná jsou plná při použití v hliníkové skříni, jelikož mají stejný součinitel teplotní roztažnosti. Výborné vlastnosti mají také stříbrná ložiska na ocelové pánvi. *“Tloušťka výstelky bývá 0,3 mm, nahoře je vrstva olova a india silná 0,025 mm. Takové ložisko snese zatížení až 50 MPa“* [1].

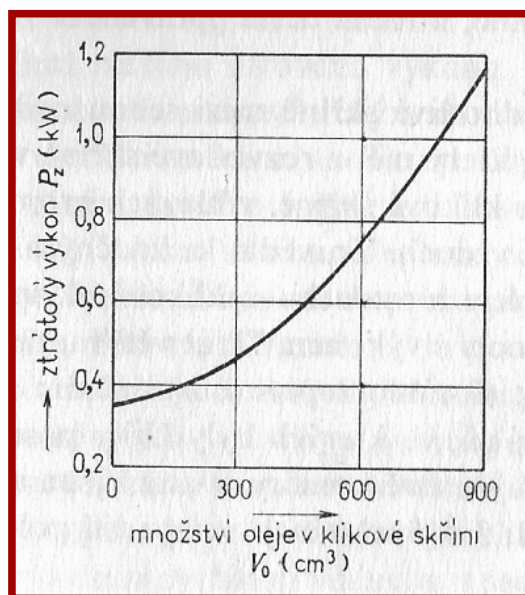
Pro zachování dobré funkce tenkostěnných ložisek je nutný tuhý a přesný otvor ve skříni. Je i nutno vyřešit různé teplotní roztahování jednotlivých dílů, aby tak zůstalo zachováno požadované předpětí v ložisku i při ohřáté klikové skříni na provozní teplotu. V ložisku bývá velká vůle, aby olej, který jím protéká, mohl odvádět z ložiska teplo [1].

Ložiska s vysokým měrným tlakem vyžadují tvrdý povrch klikové hřídele. Hřídelové čepy se kalí indukčně a nebo plamenem. Používá se také tvrdě chromovaných či nitridovaných čepů. Je nutno věnovat pozornost zejména přechodu z čepu do ramene pro zvýšení vrubové pevnosti v tomto místě. Jako vrub může působit přechod z kalené vrstvy do nekalené u kalených čepů. *“Také vyústění mazacích otvorů v čepu kliky musí být pečlivě zaobleno a někdy se okraje zpevňují zatlačováním ocelové kuličky“* [1].

3.3.2 Ztráty vířením oleje a vzduchu

3.3.2

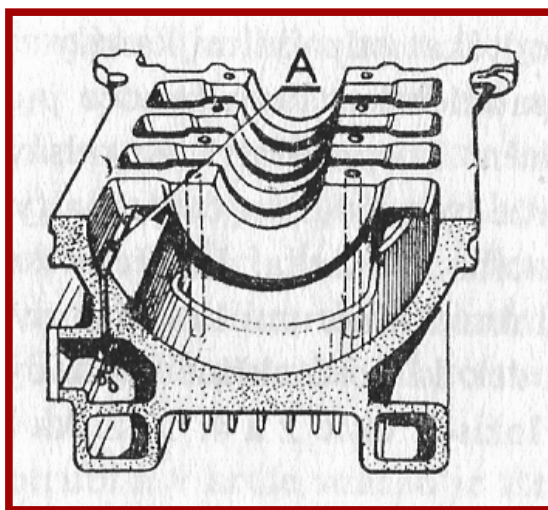
Víření oleje v klikové skříni způsobuje značné ztráty. Jako příklad je uvedena jejich závislost na množství oleje v klikové skříni u závodního motoru NSU na obr. 3.3.2a. Proto nejen u závodních motorů se z ní odčerpává olej a kliková skříň je suchá. *“I když zásoba oleje v klikové skříni zůstává, odděluje se pevnou stěnou od vlastního prostoru klikového mechanismu.“* Pro odpad oleje do spodní zásobní nádrže, kde je olej v klidu a nepění se, je v této stěně malý otvor. *“Zpěněný olej*



Obr. 3.3.2a Ztrátový výkon P_z v závislosti na velikosti olejové náplně v klikové skříni při $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ [1]

zhoršuje funkci olejového čerpadla, popř. chladiče oleje, a vyžaduje velkou nádrž“ [1].

I víření vzduchu v klikové skříni také způsobuje značné ztráty. Tak jako se ve vířivé vodní brzdě na motory maří velká energie vířením kapaliny mezi otáčejícím se rotorem a stojící skříní, tak i v klikové skříni vznikají ztráty. Vzduch má ovšem nepoměrně menší hustotu než kapalina, ale i tak jsou ztráty vířením podstatné. *“Proto je snaha vytvořit klikovou skříň jako válcový tunel, ve kterém se vzduch roztočí s klikovým mechanismem, aniž by byl brzděn vnitřním žebrováním a výstupky skříně.”* Takovýto tvar skříně byl vyvinut u motoru *Ford Cosworth DFV* a je dobře vidět na obr. 3.3.2b. Odpad oleje je tvořen sběrací drážkou a otvorem *A* [1].



Obr. 3.3.2b Spodní díl klikové skříně u motoru *Ford Cosworth DFV* má válcový tvar, který omezuje ventilační ztráty [1]

Někteří výrobci se snaží využít opravdu každé možnosti, která povede ke snížení ztrát a prodloužení životnosti. Tomu nasvědčuje snímek na obr. 3.3.2c, kde je povrch klikové hřídele upraven na velmi vysokou jakost.



Obr. 3.3.2c Na zakázku upravená kliková hřídel [11]

4 METODY PRO STANOVENÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT

4

Metody, jakými lze mechanické ztráty u klikového mechanismu a dalších soustav spalovacího motoru stanovit, vychází z experimentálního měření.

Jde především o měření za pomoci dynamometru (motorové brzdy), přípravků, které se typově různí dle toho, co a kde je zapotřebí měřit a nebo speciálně vyvinutých měřicích systémů, využívající moderní technologie diagnostiky. Zmíněná zařízení nalezneme většinou ve vývojářských centrech, výzkumných laboratořích a pod., zabývající se touto problematikou. K významným společnostem v této oblasti patří zejména *FEV*.

Výhodou některých měřicích zařízení je mimo jiné možnost měřit mechanické ztráty při použití různých maziv a materiálů, což je velmi důležité z hlediska zkoumání tribologie u spalovacích motorů.

4.1 Měření za pomoci dynamometru

4.1

Zpravidla se k měření mechanických ztrát, ale i výkonu a jiných parametrů spalovacího motoru užívá univerzální elektrický dynamometr viz. obr. 4.1.1, jelikož může pracovat nejen jako výkonová brzda, ale i jako motor, který pohání měřený nepracující spalovací motor. To znamená, že při použití nadsynchronních otáček se bude chovat jako odpor (brzda) a při podsynchronních jako zdroj (motor) [12].



Obr. 4.1.1 Elektrický dynamometr [12]

Další možností je použití absorpčního dynamometru libovolného typu. Jako příklad by se dalo uvést použití hydraulické brzdy nebo brzdy elektrické, které dokáží absorbovat výkon vířivými proudy a nabízí možnost využít metodiku měření motoru po částech, což je výhodné zejména z hlediska určení mechanických ztrát u jednotlivých skupin [12].

Požadavek na výkon dynamometru se odvíjí od užitečného výkonu měřeného spalovacího motoru. Lze měřit i jednotlivé válce [12].

Maximální výkon spalovacího motoru může být krátkodobý a postačí k tomu, aby bylo možné motor zkoušet na brzdě. Zajímavým příkladem jsou tak měření, provedená *Dr. Froedem* na závodních motocyklech *NSU* až do vysokých otáček $10\,000\text{ min}^{-1}$. Hlavní naměřená data motorů těchto motocyklů uvádí tab. 4.1.1. Při postupné demontáži jednotlivých skupin se zjistilo rozdělení ztrát. Měření ztrát se

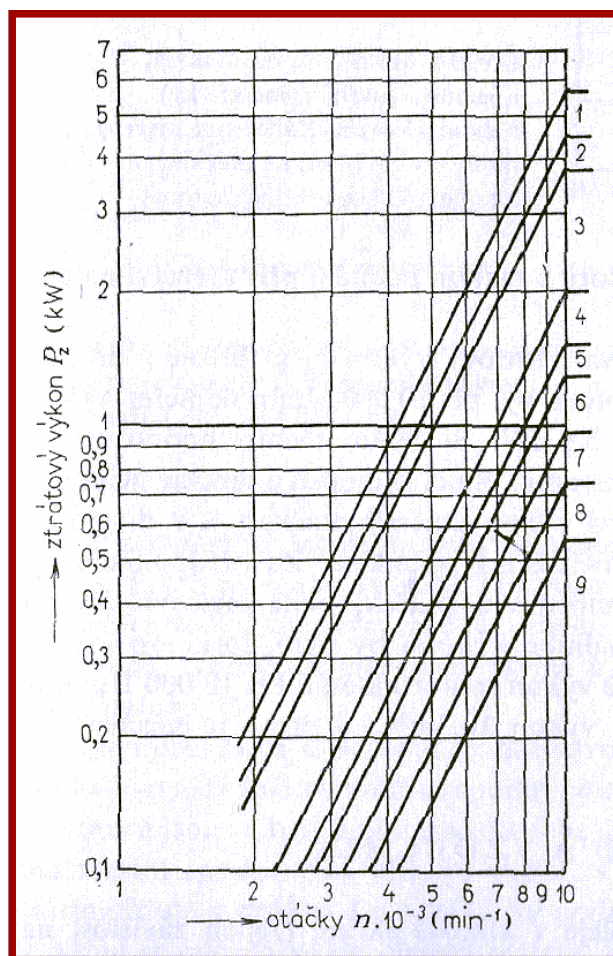
provedlo prostřednictvím cizího pohonu motoru - dynamometrem. Po celou dobu měření byla teplota motoru udržována na neměnné hodnotě. Procentuální rozdělení ztrát pro jednoválcový motor *R 11* při otáčkách $10\,000\text{ min}^{-1}$ a střední pístové rychlosti 18 m.s^{-1} je uvedeno v tab. 4.1.2 a obr. 4.1.2 [1].

Typ motoru	<i>R 11-52</i>	<i>R 22-52</i>
Počet válců	1	2
Objem válců	$123,5\text{ cm}^3$	247 cm^3
Vrtání	54 mm	54 mm
Zdvih	54 mm	54 mm
Max. výkon	$10,65\text{ kW}$	22 kW
- při otáčkách	$11\,000\text{ min}^{-1}$	$10\,000\text{ min}^{-1}$
Kompresní poměr	10	9,5
Materiál válce	litina	alfin
Karburátor – průměr hrdla	26 mm	26 mm
Rozvod	2 x OHC	2 x OHC

Tab. 4.1.1 Data závodních motorů *NSU* [1]

Ztráty vyplachováním (pumpovní)	15,8 %
Pístní kroužky 1 až 4	13,2 %
Píst	36,7 %
Ojniční ložisko (valivé)	6,6 %
Ovládání ventilů	4,6 %
Ztráty v pohonu vačkového hřídele	6,6 %
Pohon magneta	4,0 %
Olejová čerpadla	3,3 %
Hlavní ložiska a víření	9,2 %
Celkem	100 %

Tab. 4.1.2 Podíl ztrát u motocyklového motoru *NSU R 11-52* při otáčkách $10\,000\text{ min}^{-1}$ a teplotě klikové skříně 100 °C [1]



Obr. 4.1.2 Rozdělení ztrát v motocyklového motoru NSU R 11-52 [1]

Legenda obr. 4.1.2

1 – ztráta vyplachováním, 2 – tření pístních kroužků, 3 – tření pístu, 4 – ojnicí ložisko, 5 – ovládání ventilů, 6 – pohon rozvodu, 7 – pohon magneta, 8 – olejová čerpadla, 9 – hlavní ložiska a víření oleje [1]

4.2 Speciální měřicí systémy FEV

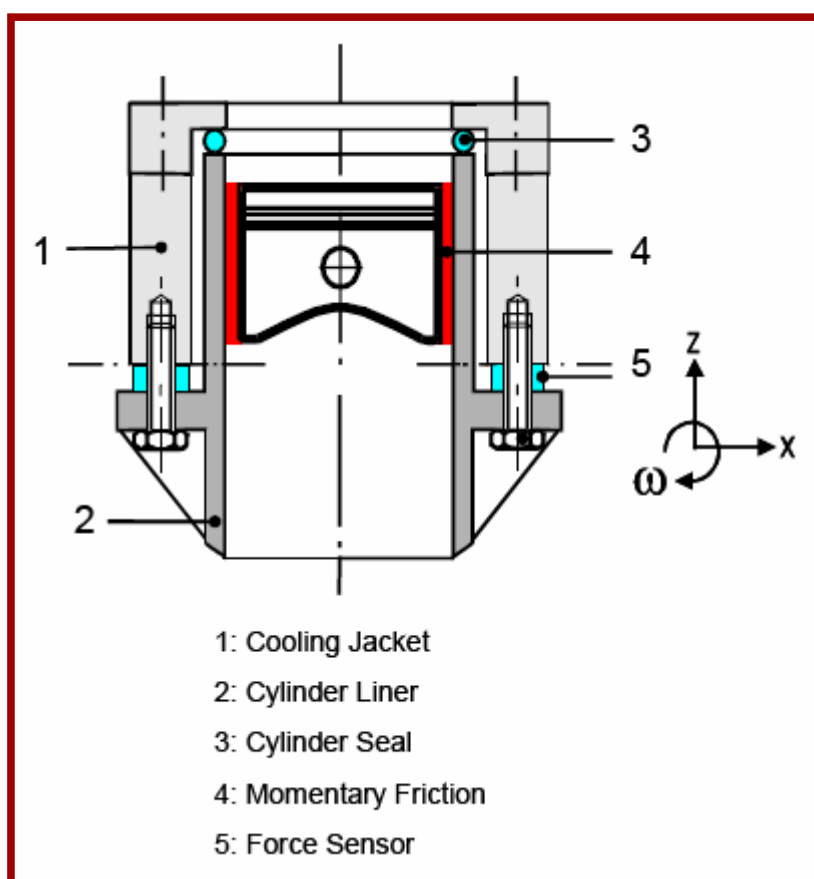
4.2

Z důvodu největšího podílu pístní skupiny na ztrátách třením v celém spalovacím motoru, začala společnost FEV provádět mnoho výzkumů týkající se tribologie soustavy píst - pístní kroužky - vložka válce. Speciální měřicí zařízení této společnosti jako *PIFFO* (měřicí systém síly tření pístu) a *LINDA* (analýza deformace vložky válce) byly vyvinuty, aby bylo možné optimalizovat tuto soustavu z hlediska tribologie a pozorovat chování tření [13].

4.2.1 Měřicí systém *PIFFO*

Systém *PIFFO* (*Piston Friction Force measurement system*) měří přímo síly mezi pístem - pístními kroužky a vložkou válce v axiálním a radiálním směru během chodu ohřátého motoru. Síly od pístu a pístních kroužků působící na vložku válce se mění během zdvihu pístu. Měřicí systém sil tření je založený na metodě "plovoucích" vložek. Vložka je podepřena čtveřicí siloměrů s trojrozměrným měřením sil a těsněním hlavy válce. Těsněním hlavy válce je speciální "o-kroužek" naplněný stlačeným plynem a fixovaný na okraji vložky v oblasti spalovací komory [13].

Společně s axiálními a radiálními silami mezi pístem a vložkou válce jsou souběžně měřeny i tlak ve válci s tlakem v klikové skříni. Tento měřicí systém, který užívá *FEV* na jednoválcovém motoru s chladicím pláštěm, znázorňuje obr. 4.2.1 [13].



Obr. 4.2.1 Měřicí zařízení označované *PIFFO* [13]

Legenda k obr. 4.2.1

cooling jacket – *chladicí plášť*

cylinder liner – *vložka válce*

cylinder seal – *těsnění válce*

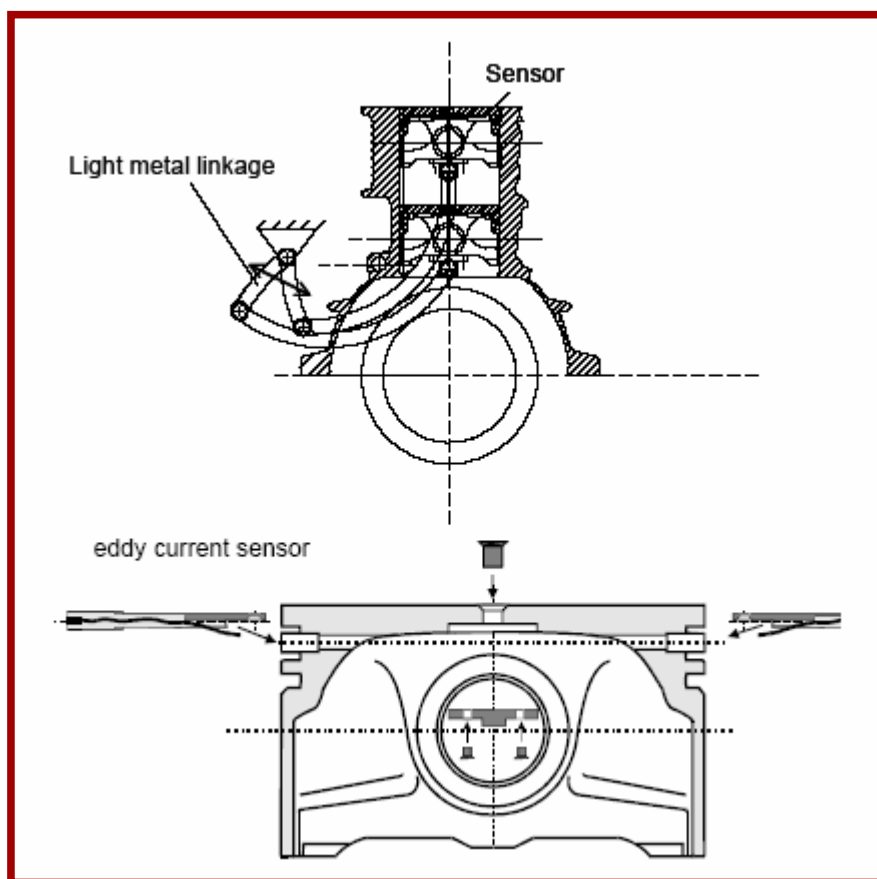
Momentary Fiction – okamžité tření

Force Sensor – silový senzor

4.2.2 Měřicí systém *LINDA*

4.2.2

Systém *LINDA* (*Liner Deformation Analysis*) je měřicí zařízení, které dovoluje měření tvaru válce při reálných podmínkách u víceválcových motorů. Pro určení zvláště deformace během chodu motoru je užíván systém měření, který měří vzdálenost vložky válce od středu pístu přes osm speciálních senzorů (senzory vířivého proudu). Signály senzorů jsou přenesené táhlem z lehkého kovu, který je fixovaný k pístu a rámu motoru. Obr. 4.2.2 zobrazuje měřicí zařízení zvané *LINDA* [13].



Obr. 4.2.2 Měřicí zařízení označované *LINDA* [13]

Legenda k obr. 4.2.2

sensor – senzor

light metal linkage – táhlo z lehkého kovu

eddy current sensor – senzor vířivého proudu

Kombinace obou měřících systémů dovoluje optimalizovat deformování vložky válce, redukci počátečního tlaku pístního kroužku a také redukovat úroveň tření celé pístní skupiny. Lze také ovlivnit prosakování, spotřebu oleje a trvanlivost [13].

Oblasti s vysokou úrovní deformací mohou být tímto způsobem identifikovány a poté optimalizovány. I sadu kroužků pístu lze optimalizovat, např. snižováním počátečního tlaku pístního kroužku. Za pomoci zařízení *PIFFO* mohou být měřeny vlivy při různých modifikacích [13].

5 MODERNÍ TRENDY PŘI SNIŽOVÁNÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT

5

5.1 Redukce hmotnosti pístu a ojnice

5.1

V dnešní době je snahou snižovat hmotnost pístu z důvodu zlepšení mechanické účinnosti při vysokých otáčkách. To pak umožňuje vysokou střední pístovou rychlost. Proto se dělá plášť pístu krátký a z lehkých materiálů (nejčastěji hliníkových slitin), většinou kovaný. U závodních motorů se pak používají slitiny hořčíku pro jejich nižší měrnou hustotu. A pokud to jde, snižuje se i počet pístních kroužků na dva (jeden těsnící a jeden stírací) [1, 14].

Stejný požadavek je kladen na ojnici. Pro její nízkou hmotnost se věnuje velká pozornost převážně slitinám titanu, které mají vysokou pevnost při malé hustotě [14].

Redukce hmotnosti těchto součástí má za následek snížení setrvačných sil spolu s momenty posuvných a rotujících hmot, namáhající klikovou hřídel s ložisky, a tedy i snížení hmotnosti klikové hřídele, což povede k poklesu ztrát třením.

Výrobci běžných spalovacích motorů již také konstruují motory jako nízkozdvihové, aby tak dosáhli nižší hmotnosti celého klikového mechanismu.

Jak v současné době vypadají komponenty klikového mechanismu různých výrobců je možné vidět na obr. 5.1.1 a obr. 5.1.2.



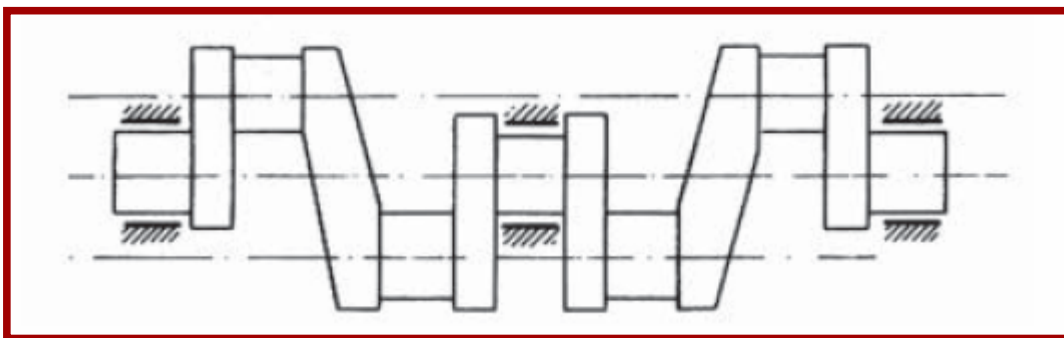
Obr. 5.1.1 Sortiment součástí klikového mechanismu i s příslušenstvím [15]



Obr. 5.1.2 Ultralehký píst a ojnice [16]

5.2 Snižení počtu ložisek u řadového čtyřválce

Zajímavým řešením, ovšem u běžných motorů, mající čtyři válce do řady, je uložení klikové hřídele místo pěti, na tři kluzná ložiska viz obr. 5.2.1. To následně vede ke snížení ztrát a zkrácení klikové hřídele. Na druhé straně jsou kladeny vysoké nároky na materiály ložisek i hřídele a to z důvodu unesení větších tlaků a namáhání pro zachování výkonu. Proto se tento způsob užívá spíše u motorů s menšími výkony. U vyšších výkonů zůstává standardní uložení na pěti ložiskách (obr. 5.2.2).



Obr. 5.2.1 Kliková hřídel čtyřválcového řadového motoru s uložení na třech ložiskách [17]



Obr. 5.2.2 Kliková hřídel čtyřválcového řadového motoru s uložení na pěti ložiskách [17]

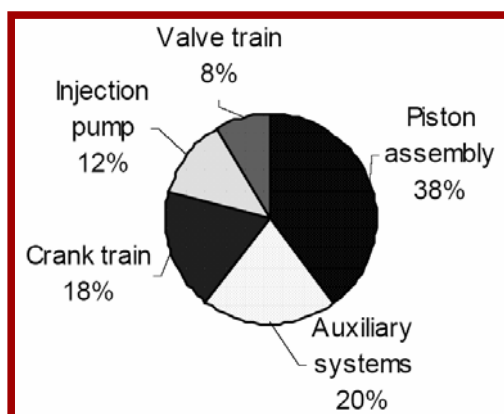
5.3 Využití pokrokových tribologických povlaků

Povlaky dnes hrají neobyčejnou a velmi důležitou roli ve spalovacích motorech. Vyspělé nano-kompozity *MeN-X* v podobě tribologických povlaků přislubují velmi vyzývavá řešení vedoucí ke snížení opotřebení a spotřeby energie. Nano-kompozitní povlaky typu *MeN-X* (např. *MoN*/nitrid molybdenu v nano velikosti) obklopené měkkým kovem (např. měď, stříbro, cín) disponují vysokou tvrdostí přes 40 *GPa*, nízkým součinitelem tření a zanedbatelným opotřebením oproti oceli, hliníku nebo oxidu hlinitému. Zlepšování tribologických vlastností součástí spalovacího motoru je tak založeno na plazmatickém deponování nano-kompozitů na povrch materiálu [18].

5.3.1 Snižování ztrát třením ošetřením povrchu

5.3.1

Ztrátové výkony v motoru a součástech motoru kvůli tření tvoří cca. 15 % z celkového množství ztrát energií ve vozidle. Velké tření související se ztrátovými výkony se vyskytuje ve vložkách válců / pístů - pístních kroužků. Klikový pohon, ventilový rozvod a vstřikovací čerpadla jsou další součásti, které přispívají k těmto ztrátám viz. obr 5.3.1 [18].



Obr. 5.3.1 Procentuální rozdělení podílů ztrát třením u jednotlivých skupin ve spalovacích motorech [18]

Legenda k obr. 5.3.1

<i>crank train</i>	–	<i>klikový mechanismus</i>
<i>injection pump</i>	–	<i>vstřikovací čerpadlo</i>
<i>valve train</i>	–	<i>ventilový rozvod</i>
<i>piston assembly</i>	–	<i>pístní skupina</i>
<i>auxiliary systems</i>	–	<i>ostatní ústrojí</i>

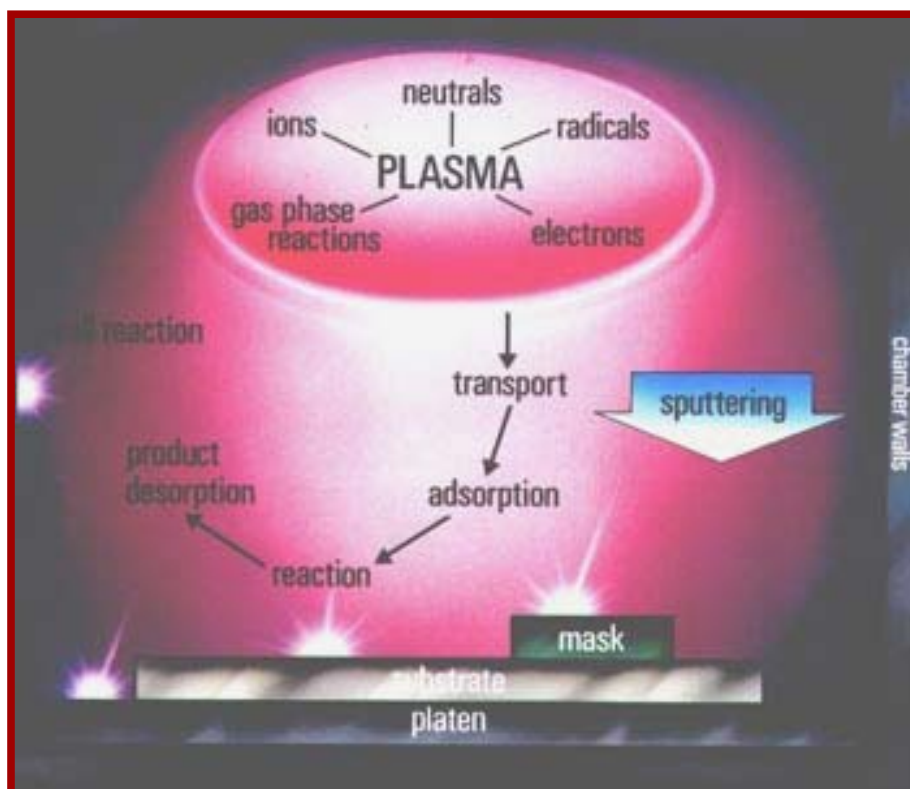
V současné době fyzikální depozice z plynné fáze (*PVD = Physical Vapor Deposition*), plazmou podporovaná chemická depozice z plynné fáze (*PACVD = Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*) jsou základem pro výrobu povlaků, které se aplikují v potřebném rozsahu na součásti motoru pro efektivní snížení ztrát třením [18].

5.3.2 Výroba povlaků

5.3.2

Pro výrobu povlaků nebo modifikování povrchů se používají technologie, které jsou založeny na využití vlastností nízkoteplotního plazmatu. Základní schéma výrobního procesu je na obr. 5.3.2. “Látku, která má být vpravena do povrchové vrstvy součástí nebo nanесena na součásti ve formě povlaku, je třeba převést do

plynné fáze. Atomy nebo molekuly látky jsou v plynné fázi částečně ionizovány a dostávají se do styku s plazmatem vznikajícím ve výboji v pracovním plynu.“ Pro technologický proces je tento výboj hlavním zdrojem energie. “Tok částic látky může být usměrňován účinkem elektrického pole nebo kombinací elektrického a magnetického pole na povrch součástí, kde se částice usazují a poté buď difundují do povrchové vrstvy součástí nebo vytvářejí povlak.“ Součásti mohou být připojeny na zdroj napětí, který v jejich okolí vytváří další elektrické pole, ještě více urychlující částice dopadající na povrch. Potom se hovoří, že součásti mohou mít vůči plazmatu předpětí [19].



Obr. 5.3.2 Základní schéma výrobního procesu povlaku [19]

Legenda k obr. 5.3.2

<i>plasma</i>	–	<i>plazma</i>
<i>gas phase reactions</i>	–	<i>reakce plynné fáze</i>
<i>electrons</i>	–	<i>elektrony</i>
<i>ions</i>	–	<i>ionty</i>
<i>radicals</i>	–	<i>pronikavá</i>
<i>neutrals</i>	–	<i>bezbarvá</i>
<i>transport</i>	–	<i>přenos</i>

<i>adsorption</i>	–	<i>adsorpce (pohlcování)</i>
<i>sputtering</i>	–	<i>naprašování</i>
<i>substrate</i>	–	<i>substrát</i>
<i>mask</i>	–	<i>clona</i>
<i>platen</i>	–	<i>deska</i>
<i>reaction</i>	–	<i>reakce (působení)</i>
<i>product desorption</i>	–	<i>výsledek desorpce - uvolnění adsorbovaných molekul z povrchu látky</i>
<i>chamber walls</i>	–	<i>stěny komory</i>

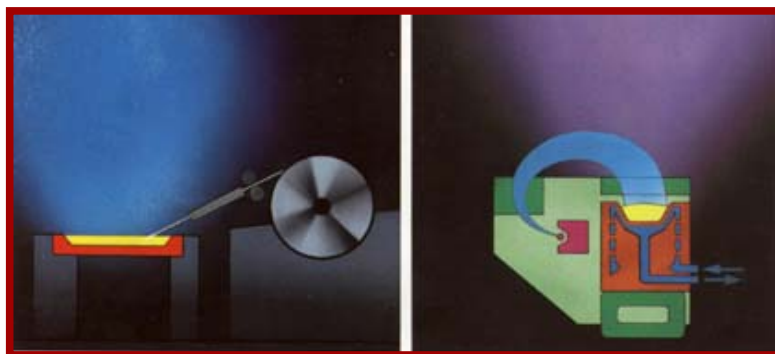
Není zapotřebí se dále zabývat metodami modifikujícími povrchové vrstvy materiálu jako jsou iontová implantace nebo plazmová nitridace, ale spíše se soustředit na vytváření povlaků. Způsoby nanášení povlaků se rozlišují především podle metody používané pro uvedení materiálu do plynné fáze [19].

Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD = physical vapor deposition)

Z pevné do plynné fáze přechází vytváření povlaků fyzikálními pochody: vypařováním nebo naprašováním. Tyto dva pochody se provádějí za sníženého tlaku, obvykle však při tlaku nižším než je 0,1 Pa (tj. řádově milionkrát nižším než je atmosférický tlak). “*Součásti, na které mají být nanášeny povlaky, se umísťují do blízkosti vypařovacího nebo naprašovacího zařízení tak, aby atomy nebo molekuly vypařené látky se usazovaly na jejich povrchu*“ [19].

I. Vypařování

U vypařování se využívá skutečnosti, že bod varu látek klesá s tlakem. To znamená, že tlak nasycených par látky roste s teplotou. “*Pro získání par pevných látek jsou proto za nižších tlaků třeba podstatně nižší teploty než za atmosférického tlaku.*“ Základní způsoby ohřevu materiálu nad bod varu jsou znázorněny na obr. I.

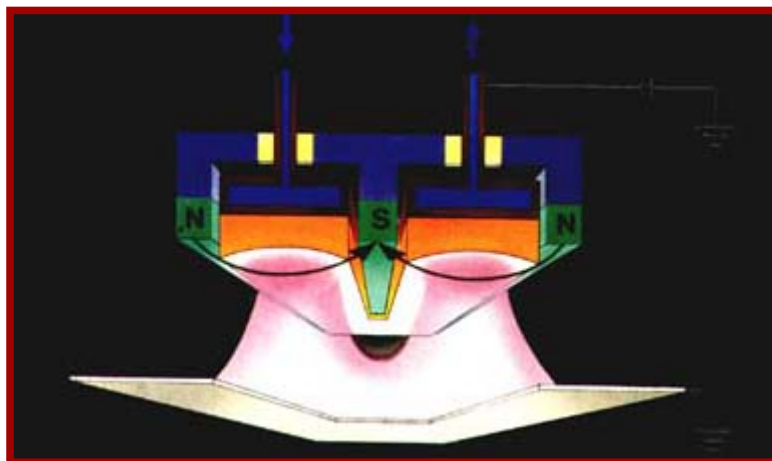


Obr. I Základní způsoby ohřevu materiálu na bod varu [19]

U prvního z obrázků je materiál umístěn v kovovém kelímku, kterým prochází silný elektrický proud. Na druhém je vypařovaný materiál umístěn ve vodou chlazeném měděném kelímku a je ohříván dopadem svazku elektronů vysílaném elektronovou tryskou [19].

II. Naprašování

Princip naprašování je založen na sekundární emisi iontů. *“Ionty pracovního plynu jsou urychlovány elektrickým polem a dopadají na povrch naprašovaného materiálu ve formě plochého nebo válcového terče (targetu)” viz obr II. “Jejich účinkem jsou z povrchu vytrhávány atomy terče, které se často průchodem oblastí ionizovaného pracovního plynu samy ionizují a dopadají na povrch povlakovaných součástí.”* Množství naprašovaných pevných látek je veliké. Vylučují se pouze látky s nízkou tenzí (tlakem) nasycených par za pokojové teploty. Musí se však rozlišovat látky elektricky vodivé a elektricky nevodivé. U látek elektricky nevodivých je pak nutno zabránit nabíjení terče za použití střídavého elektrického pole [19].



Obr. II Princip činnosti naprašování [19]

Chemická depozice z plynné fáze (CVD = chemical vapor deposition)

Do pracovní komory je přiváděn materiál pro povlaky (titan, hliník, uhlík) již v plynné fázi - $TiCl_4$, $AlCl_3$, CH_4 . Kombinovaným účinkem výboje a vysoké teploty součástí se tyto plyny v komoře rozkládají, s pracovními plyny reagují a vzniklé sloučeniny (TiN , TiC , $TiCN$, Al_2O_3) na povrchu součástí kondenzují. K nevýhodám patří vysoká teplota, potřebná pro rozklad sloučenin (možnost nevratných změn vlastností materiálů), dále vznik ekologicky závadných vedlejších produktů a omezený rozsah prvků, které mají sloučeniny v plynném skupenství [19].

“U moderních variant se užívá vysokofrekvenčního buzení výboje, do plynu se zavádí elektromagnetické záření s frekvencemi řádově stejnými, jako jsou užívány v mikrovlnných troubách” [19].

5.3.3 Vložka válce – píst – pístní kroužky

5.3.3

Nejběžněji užívaný materiál pro výrobu bloků motoru je litina. Ale z důvodu snížení hmotnosti bloků se začaly užívat materiály ze slitiny hliníku. Avšak kvůli mechanickým a tribologickým omezením se i u těchto bloků stále nejvíce užívá litinová vložka válce. Zlepšení pracovního účinku pístu a pístních kroužků v pracovní části vložky válce respektive snížení tření a omezení opotřebení těchto součástí je možné dosáhnout deponováním povlaků na povrch litinové vložky válce. Jedná se zejména o tepelně a plazmaticky naprašované povlaky, několikavrstvé povlak tvrdého chromování a nebo povlak nikasilový (nikl + silikon). Tyto způsoby jsou v současné době velmi používány [18].

Další způsob, který se v této oblasti navrhuje a testuje, je použití celého bloku motoru z hliníku s nebo bez hliníkových vložek. K tomu je zapotřebí několikero naprašování povlaků plazmou na základě technologie *PVD* s modifikací povrchu laserem, vhodných krycích povlaků s vlastnostmi tepelné clony ke zlepšení schopnosti rychleji dosáhnout provozní teploty motoru a také několik povlaků na bázi plazmy, které se navrhuje pro pístní kroužky, aby mohly odolávat vyššímu tlakovému kontaktu a současně zajistit nízký koeficient tření. Tyto vlastnosti umožní zvýšení kompresního poměru a lepší kvalitu spalování [18].

V současné době jsou již továrensky přijaty *PVD* povlaky k příslušenství pístu. Jsou to 30 mikrometrů silné *CA-PVD CrN* povlaky, které začaly být aplikovány na pístních kroužkách - diamant jako uhlík (*DLC*) nebo *Me* legovaný *DLC* - pokrytí pístních čepů vyrobené technologií *PACVD* [18].

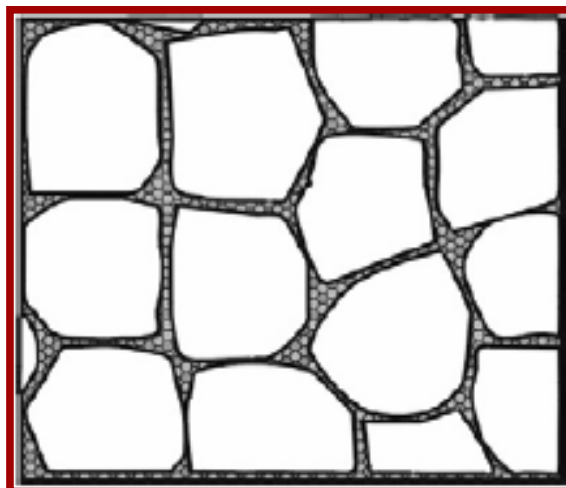
5.3.4 Nano-kompozitní povlak je cestou ke snížení opotřebení a tření

5.3.4

Struktura nano-kompozitních typů *MeN-X* je složená z mísitelných kovových nitridů a měkkých kovů jako jsou měď a stříbro. S tímto konceptem jako první přišel pan *Musil* a jeho spolupracovníci. Zavedení fáze *X* do struktury má za následek vytvoření nano-krystalické struktury složené z *MeN* matice o nano velikosti, obklopené měkkým kovem [18].

Zavedením druhé fáze k 1 - 2 % dojde ke značnému nárůstu tvrdosti a změně ze sloupčové na rovnoosou zrnitou strukturu. Dalším zvýšením fáze "*X*" dojde ke zhuštění a to má za následek zmenšení velikosti zrna a tvrdosti. Z tribologického hlediska tyto struktury poskytují nové možnosti, jak efektivně snížit tření [18].

Je možné zvýšit kluzkost tvrdého povlaku zavedením měkkého kovu do struktury, nebo přidat kovy do struktury, která může tvořit kluzké filmy spolu s interakcí složek olejů. Oba přístupy jsou předmětem laboratorních testů a studií v *ITU* (*Istanbul Technical University*) metalurgických a materiálových inženýrských oddělení a laboratoří s divizí povrchové technologie a tribologie [18].



Obr. 5.3.4 Zobrazení struktury nano-kompozitního typu *MeN-X* [18]

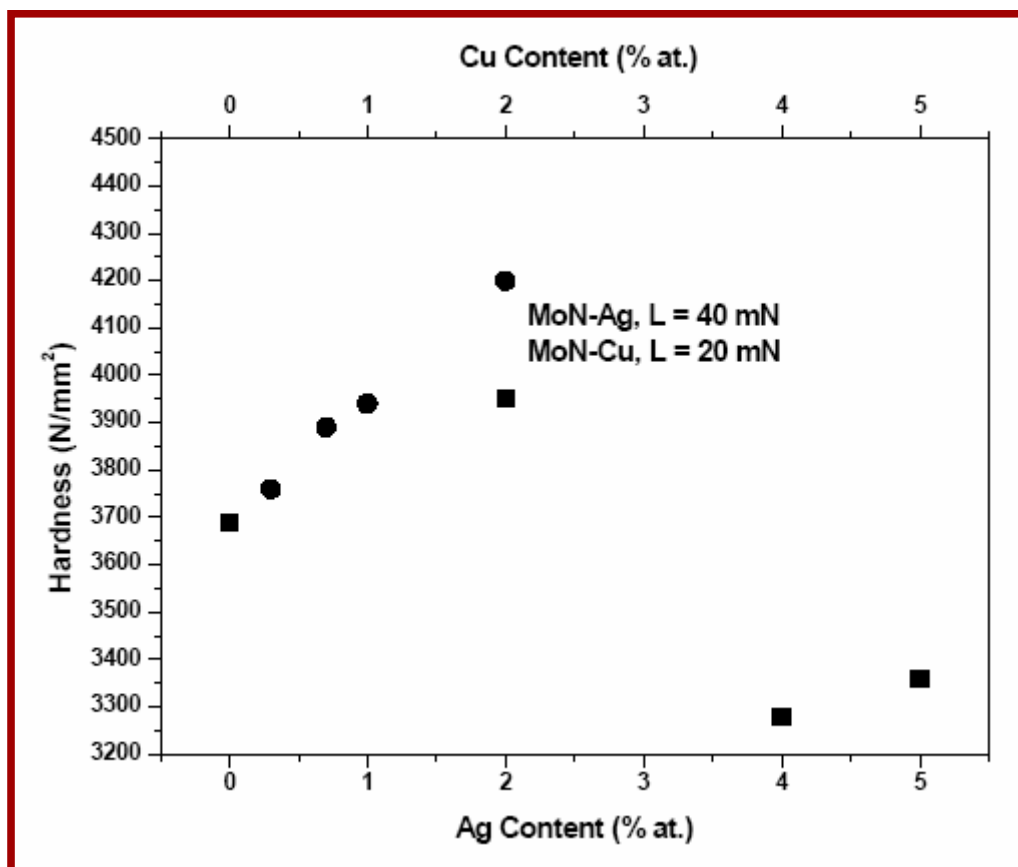
5.3.5 Provedení tribologických povlaků *MoN-Ag* a *MoN-Cu*

MoN je vybrán jako *MeN* fáze kvůli jeho vyšší tvrdosti ve srovnání s dalšími nitridy jako *TiN*, *CrN*, *ZrN* a lepším tribologickým vlastnostem. *Ag* a *Cu* jsou vybrány jako fáze “X” beroucí do úvahy možnost tvoření kluzkých oxidů molybdenu, mědi a stříbra respektive molybdenanů a také možnost rozptýlu měkkého kovu k ploše styku se zvětšenou teplotou kvůli tření. Navíc stříbro je dobře známé tuhé mazivo za vysokých teplot [18].

Očekávané reflexe strukturálních změn indukovaných *Ag* a *Cu* přísadami mohou být mechanické a nebo tribochemické. Proměna sloupkové struktury do vláknito-rovnoosé může mít za následek lepší rezistenci k cyklickému zatěžování (únava materiálu). Vysoká schopnost tvoření kluzkých oxidů *Mo - Cu - Ag* v kontaktní oblasti během opotřebování může mít pozitivní účinek na tribologické chování [18].

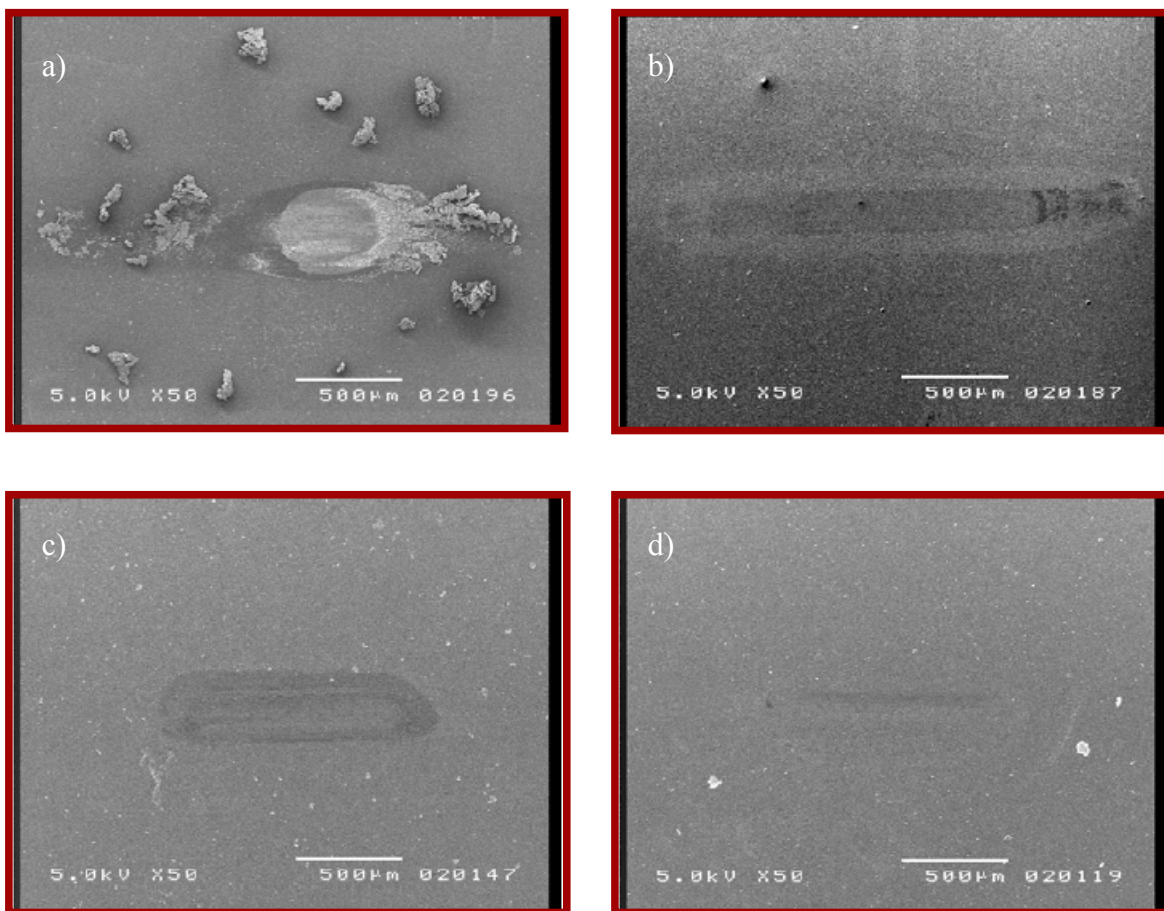
Viditelný vliv tribologických filmů a struktury na tribologické chování v sérii opakujících se zkoušek opotřebování při náročných podmínkách byl uskutečněn až s povlaky *MoN*, *MoN-Cu* a *MoN-Ag*. Povlaky jsou vyrobené zkříženou technikou založenou na *CA-PVD*. Plazma molybdenu je vytvořená *CA-PVD* a měkký kov je zavedený do povlaku rozprašovacím magnetronem [18].

Zavedení mědi a stříbra k 1- 2 % koncentraci zvýší tvrdost. Další zvýšení má pak za následek očekávané snížení tvrdosti (viz obr. 5.3.5a). Pro zřetel *CAPVD TiN* potažený vzorek (*HSS* substrát, tloušťky 2,5 μm , s tvrdostí 30 *GPa*) je také testován při stejných podmínkách [18].



Obr. 5.3.5a Závislost tvrdosti na obsahu *Cu-Ag* v *MoN* vrstvách [18]

Povlaky *TiN* po náročných zkušebních podmínkách ukazují velmi špatný účinek, povlak je totálně degradovaný v několika prvních tisících cyklů. Ale povlaky *MoN* ukazují daleko lepší účinek ve srovnání s *TiN*; dosáhly nižšího součinitele tření 0,45 a nepatrné opotřebení – hloubka opotřebení je okolo poloviny mikrometru. Přidání mědi a stříbra má za následek další snižování součinitele tření k hodnotě kolem 0,3 s téměř žádným opotřebením. Pozorují se pouze nepatrné rýhy (obr. 5.3.5b a-d) [18].

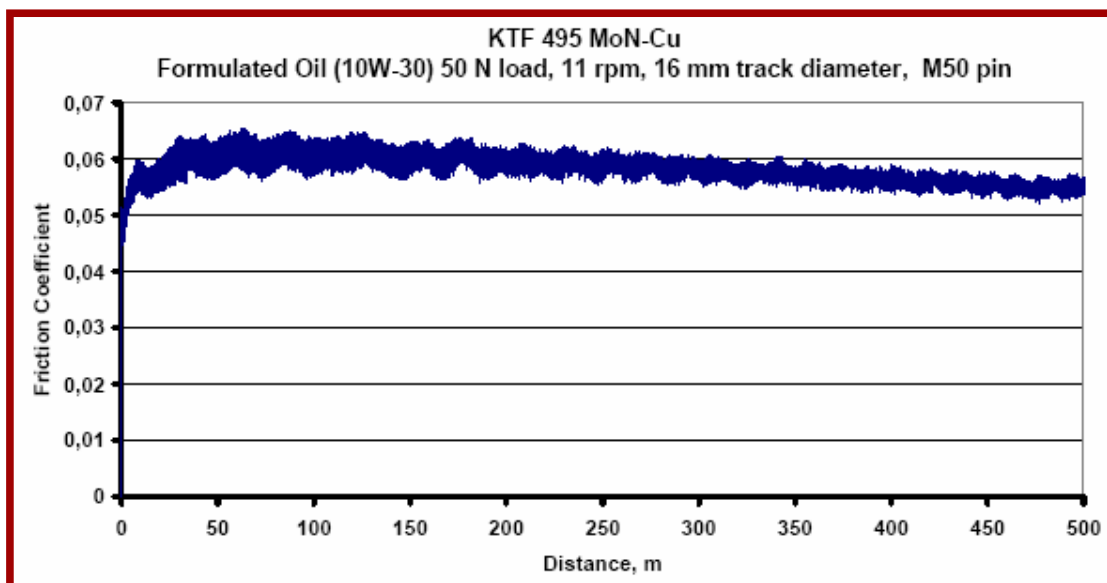


Obr. 5.3.5b SEM snímky po opakovaných testech vykazují opotřebení v podobě rýh:
a) povlak *TiN*, b) povlak *MoN*, c) povlak *MoN-2% Cu*, d) povlak *MoN-5% Ag* [18]

Další pozitivní účinek *Cu* a *Ag* se pozoruje na intenzitě opotřebení kuliček oxidu hlinitého. Přidáním *Cu* a *Ag* se tedy opotřebením kuliček snížil počet rýh na 2 - 3. Ze všech povlaků je širší stop opotřebení na povlaku *MoN-5% Ag* nejužší a současně vykazuje minimální opotřebení kuliček. Tyto výsledky dokazují důležitou roli tribofilmů na stav opotřebení. *TiN* s tvrdostí 30 *GPa* v náročných podmínkách nevyhovuje [18].

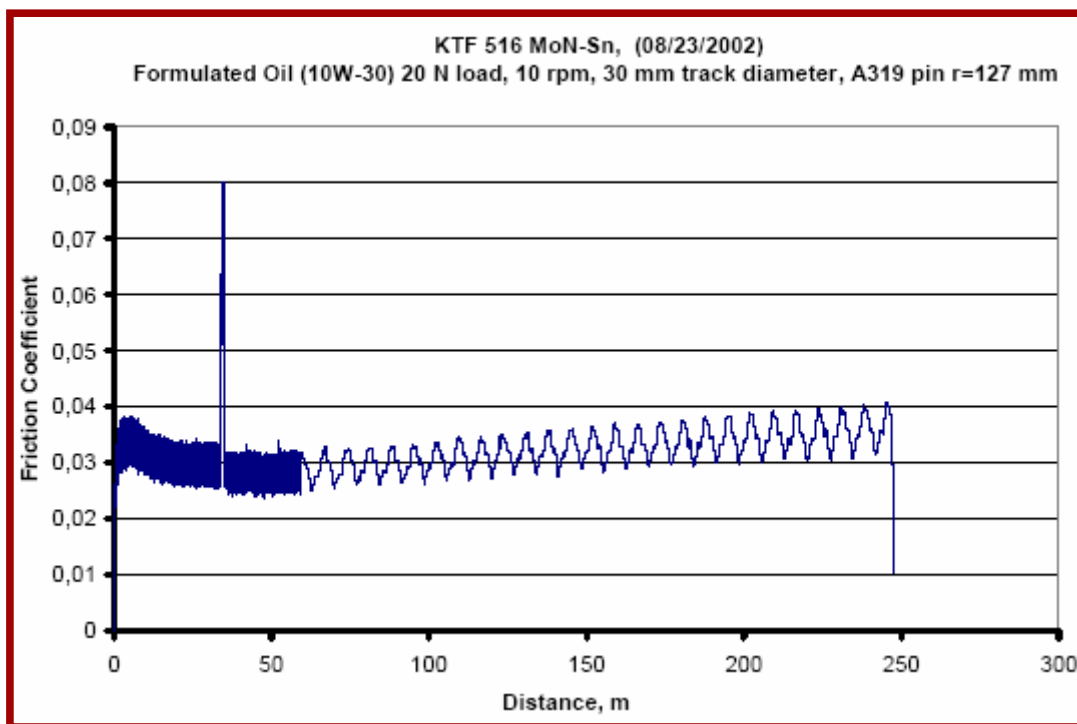
Nicméně *MoN*, který je známý tvořením kluzkých oxidů molybdenu, má účinek uspokojivý. Přidáním mědi do povlaku se dosahuje lepších mazacích vlastností oxidů molybdenu a mědi (molybdenany). V případě přidání 5 % stříbra se dosahuje dalšího zlepšení z hlediska opotřebení. Ačkoli tento povlak má nižší tvrdost 33 *GPa* ve srovnání s ostatními ze série povlaků *Mo - N - Ag - Cu*, dosahuje nejlepšího účinku a stále více prokazuje svoji dominantní roli u tribofilmů ovlivňující opotřebení [18].

Výsledky indikují, že tyto povlaky mohou být použity ke zlepšování tribologického chování zejména pro vyšší odolnost vůči otěru a kontaktní únavě. Povlaky rovněž vykazují extrémně nízké součinitele tření (jen 0,05) s velmi dobrými mazacími a kluznými vlastnostmi při režimu mezního mazání a mohou být aplikované na různé druhy materiálů. Navíc žádné znatelné opotřebení se na povlaku i ocelových čepech neobjevuje [18].



Obr. 5.3.5c Průběh velikosti součinitele tření u nano-kompozitních povlaků typu *MoN-Cu* po dráze pohybu při režimu mezního mazání [18]

Další experimenty vedou na další modifikaci povlaků *MoN-X* (*MoN-Sn*), prokazující velmi slibné výsledky oproti čepům ze slitiny *Al-Si* (obr. 5.3.5d) [18].



Obr. 5.3.5d Průběh velikosti součinitele tření u nano-kompozitních povlaků typu *MoN-Sn* po dráze pohybu při režimu mezního mazání na čepch ze slitiny *Al-Si* [18]

Toto unikátní chemické složení povlaků dává novou možnost, jak součinně působit na životní prostředí s aditivními přísadami maziv, aby se dosáhlo nízkých

součinitelů tření i s režimy mezního mazání. Tento způsob pak zaručeně vede k úspoře energie spolu se zlepšením trvanlivosti a spolehlivosti součástí [18].

Nano-kompozitní povlaky, skládající se z měkkého kovu a nitridu, karbidu nebo karbonitridu tvrdého kovu, mají velký potenciál pro řešení problémů tribologie v automobilovém průmyslu. Povlaky lze také přizpůsobit dle konkrétních požadavků [18].

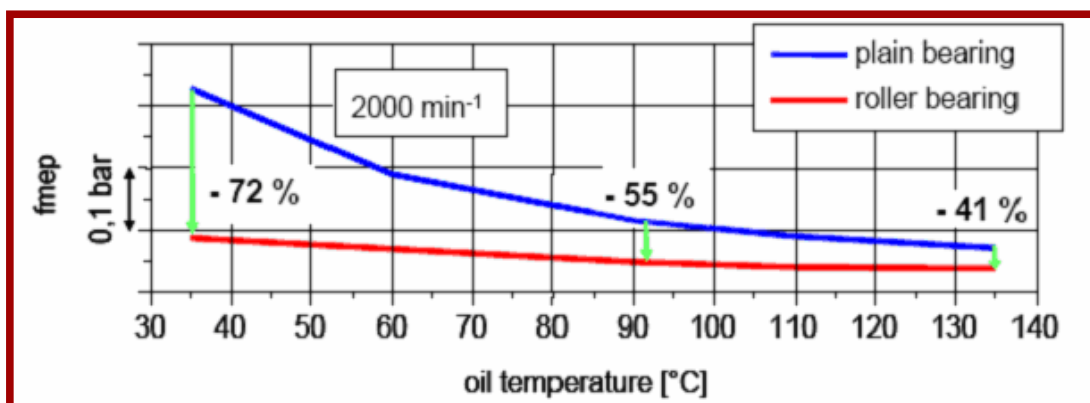
5.4 Efektivní způsob snížení spotřeby paliva ve spalovacích motorech

V současné době se zkouší nová koncepce, jak efektivně snížit spotřebu paliva u víceválcových spalovacích motorů úpravou uložení klikového mechanismu. Jedná se o náhradu kluzných ložisek valivými s použitím nedělené klikové hřídele a nedělených ojníc [20].

Tato koncepce se začala testovat na čtyřválcovém motoru o objemu 1,6 l. Výsledek byl takový, že zavedení valivých ložisek vedlo ke snížení spotřeby paliva až o 5,4 % ve srovnání se standardním uložením kluznými ložisky. Z daného testu vyplynulo snížení tření klikového mechanismu, což ovlivnilo snížení spotřeby paliva při zachování výkonu motoru [20].

Jako vedlejší efekt při použití valivých ložisek může být další snížení tření zapříčiněného olejovým čerpadlem. U valivých ložisek není třeba takového tlaku a množství mazacího oleje. Proto objem průtoku oleje může být značně snížen. Na mazání motoru stačí menší olejové čerpadlo, které vykazuje menší tření [20].

Střední efektivní tlak tření ($FMEP$) v klikovém mechanismu je do značné míry ovlivňován teplotou oleje. Toto je patrné z grafu v obr. 5.4.1. U obou typů uložení se však projevuje rozdílně. Kluzné uložení při teplotě oleje 35 °C má 72 %, při 90 °C má 55 % a při 135 °C stále ještě 41 % rozdílnost $FMEP$ oproti valivému uložení [20].



Obr. 5.4.1 Závislost $FMEP$ na teplotě oleje u obou typů uložení klikového mechanismu [20]

Legenda k obr. 5.4.1

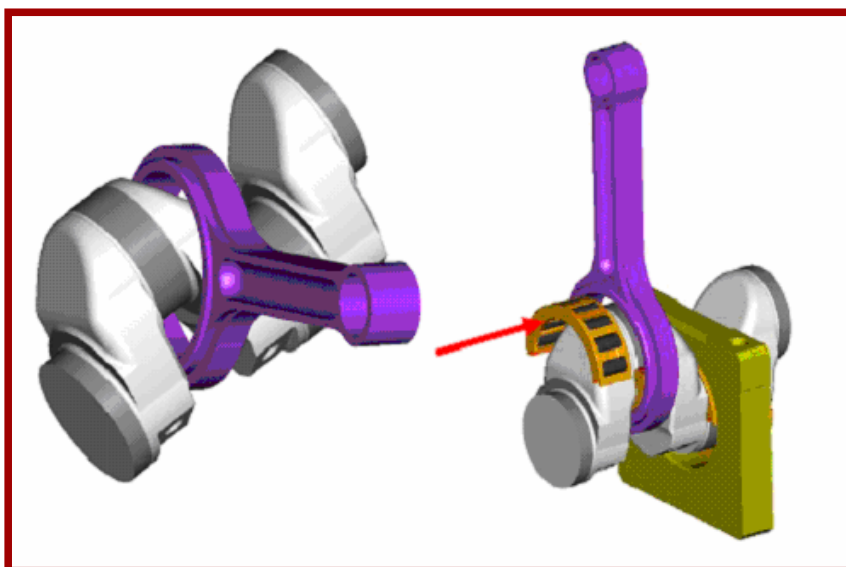
plain bearing — kluzné ložisko

roller bearing — válečkové ložisko

oil temperature – *teplota oleje*

f_{mep} (the friction mean effective pressure) – *střední efektivní tlak tření*

Na obr. 5.4.2 je z detailu patrná konstrukce klikové hřídele, která umožňuje navlékání ojníc a hlavních ložisek i s domečkou. Po tomto úkonu se teprve provádí montáž protizávaží.



Obr. 5.4.2 Navlékání ojnice s klecí ložiska a montáž valivých ložisek [20]

Na obr. 5.4.3 je znázorněn způsob montáže klikového mechanismu včetně protizávaží označených červenou barvou. Domečky hlavních ložisek nejsou součástí bloku motoru, jako bývá zvykem u kluzného uložení. K bloku motoru se kotví svorníky.



Obr. 5.4.3 Montáž klikového mechanismu a snímek bloku motoru [20]

6 ZÁVĚR

Výzkum v této oblasti může mít značný přínos nejen pro úsporu paliva. Je třeba si uvědomit, že zásoby ropy jsou omezené. Dále je třeba zdůraznit vliv výfukových plynů na životní prostředí. To znamená, že při snížení spotřeby pohonných hmot tak dochází i ke snížení množství výfukových plynů, což je v současné době z ekologického hlediska prioritou.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

7

- [1] MACKERLE, Julius. *Motory závodních automobilů*. 1. české vydání. Praha: ALFA, 1980. 193 s. bez ISBN

Elektronické zdroje

- [2] URL: <https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/79988/cviceni/vozidlove_motory.pdf>, [cit. 2009-05-04]
- [3] URL: <<http://www.usysla.eu/inventor/galerie/klikovka/00-.png>>, [cit. 2009-05-04]
- [4] URL: <<http://udmt.kvalitne.cz/08meckli.gif>>, [cit. 2009-05-08]
- [5] URL: <http://dreamcars.nfscenter.net/upload/clanky/klikova_hridel.jpg>, [cit. 2009-05-08]
URL: <<http://dreamcars.nfscenter.net/upload/clanky/ojnice.jpg>>, [cit. 2009-05-08]
URL: <http://dreamcars.nfscenter.net/upload/clanky/rez_pistem.jpg>, [cit. 2009-05-08]
- [6] URL: <http://i3.ebayimg.com/03/i/08/ff/d0/88_1_b.jpg>, [cit. 2009-05-10]
- [7] URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD#Sou.C4.8Dinitel_smykov.C3.A9ho_t.C5.99en.C3.AD>, [cit. 2009-05-10]
- [8] URL: <https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/79988/prednasky/prednaska3_6km.pdf>, [cit. 2009-05-11]
- [9] URL: <<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=388>>, [cit. 2009-05-11]
- [10] URL: <<http://www.spsteplice.cz/download/Doplnek%20k%20vykladu%20-%20pistove%20kompresory.pdf>>, [cit. 2009-05-25]
- [11] URL: <<http://web.skodateam.cz/files/1301>>, [cit. 2009-05-25]
- [12] URL: <http://tf.czu.cz/~PEXA/Predmety/TD/Prednasky/4p_TechDiag.pdf>, [cit. 2009-05-25]
- [13] URL: <<http://210.101.116.115/fisita/pdf/A165.pdf>>, [cit. 2009-05-25]
- [14] URL: <<http://www.mjauto.cz/newdocs/motor/kap3.htm>>, [cit. 2009-05-25]
- [15] URL: <<https://secure.pawengineparts.com/Images/Kits/SPCC4542377/Large/454ChevyCrank.jpg>>, [cit. 2009-05-25]

- [16] URL: <http://www.ultralightplane.com/Engines/138hp,_160_lbs,_4_stroke_,4_cylinder_engine/piston_head.jpg>,
[cit. 2009-05-25]
URL: <http://www.ultralightplane.com/Engines/138hp,_160_lbs,_4_stroke_,4_cylinder_engine/crank.jpg>,
[cit. 2009-05-25]
- [17] URL: <http://www.skolahostivar.cz/DownloadPF/prakticka-dilna_06_2005.pdf>, [cit. 2009-05-25]
- [18] URL: <<http://www.icatconf.org/icat2000-2006/tr/2004/matbaa/papers/21.Mustafa%20Urgen%20-%20urgenetal.pdf>>, [cit. 2009-05-25]
- [19] URL: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/plazma/plazma.htm>>, [cit. 2009-05-25]
- [20] URL: <http://www.vka.rwth-aachen.de/PDFs/Publikationen/2006/20060530_Kal_VDI-Tagungsbandtext%20Gleit-%20und%20W%C3%A4rmezylinder_Wiesloch.pdf>, [cit. 2009-05-25]

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

8

- Obr. 1 Běžné konstrukční uspořádání klikového mechanismu současné doby pro motor se čtyřmi válci v řadě [3]
- Obr. 2 Základní schéma klikového mechanismu pro jednoválcovou soustavu [4]
- Obr. 2.1 Kliková hřídel a její části [5]
- Obr. 2.2 Ojnice a její části [5]
- Obr. 2.3.1 Čtvrtinový řez pístem [5]
- Obr. 2.3.2 Píst s příslušenstvím [6]
- Obr. 3.1.1 Znázornění oblastí hlavních zdrojů mechanických ztrát v klikovém mechanismu [8]
- Obr. 3.1.2 Vektorové působení tlaku plynů na píst a pístní kroužek znázorněné v řezu [8]
- Obr. 3.2 Průběh tlaku v mazací vrstvě v ložisku při otáčejícím se hřídeli [1]
- Obr. 3.3.1a *Hirthova* spojka s čelním ozubením [10]
- Obr. 3.3.1b Použití *Hirthovy* spojky s čelním ozubením pro spojení částí dělené klikové hřídele pro uspořádání válců do řady [10]
- Obr. 3.3.1c Použití *Hirthovy* spojky s čelním ozubením pro spojení částí dělené klikové hřídele pro uspořádání válců do “V” [10]
- Obr. 3.3.1d Vliv přesahu lisování na moment prokluzu u čepu (*Honda*) [1]
- Obr. 3.3.1f Kliková hřídel motoru *Mercedes-Benz W 125* [1]
- Obr. 3.3.2a Ztrátový výkon P_z v závislosti na velikosti olejové náplně v klikové skříni při $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ [1]
- Obr. 3.3.2b Spodní díl klikové skříně u motoru *Ford Cosworth DFV* má válcový tvar, který omezuje ventilační ztráty [1]
- Obr. 3.3.2c Na zakázku upravená kliková hřídel [11]
- Obr. 4.1.1 Elektrický dynamometr [12]
- Obr. 4.1.2 Rozdělení ztrát v motocyklového motoru *NSU R 11-52* [1]

Obr. 4.2.1	Měřicí zařízení označované <i>PIFFO</i> [13]
Obr. 4.2.2	Měřicí zařízení označované <i>LINDA</i> [13]
Obr. 5.1.1	Sortiment součástí klikového mechanismu i s příslušenstvím [15]
Obr. 5.1.2	Ultralehký píst a ojnice [16]
Obr. 5.2.1	Kliková hřídel čtyřválcového řadového motoru s uložením na třech ložiskách [17]
Obr. 5.2.2	Kliková hřídel čtyřválcového řadového motoru s uložením na pěti ložiskách [17]
Obr. 5.3.1	Procentuální rozdělení podílů ztrát třením u jednotlivých skupin ve spalovacích motorech [18]
Obr. 5.3.2	Základní schéma výrobního procesu povlaku [19]
Obr. I	Základní způsoby ohřevu materiálu na bod varu [19]
Obr. II	Princip činnosti naprašování [19]
Obr. 5.3.4	Zobrazení struktury nano-kompozitního typu <i>MeN-X</i> [18]
Obr. 5.3.5a	Závislost tvrdosti na obsahu <i>Cu-Ag</i> v <i>MoN</i> vrstvách [18]
Obr. 5.3.5b	SEM snímky po opakovaných testech vykazují opotřebení v podobě rýh: a) povlak <i>TiN</i> , b) povlak <i>MoN</i> , c) povlak <i>MoN-2% Cu</i> , d) povlak <i>MoN-5% Ag</i> [18]
Obr. 5.3.5c	Průběh velikosti součinitele tření u nano-kompozitních povlaků typu <i>MoN-Cu</i> po dráze pohybu při režimu mezního mazání [18]
Obr. 5.3.5d	Průběh velikosti součinitele tření u nano-kompozitních povlaků typu <i>MoN-Sn</i> po dráze pohybu při režimu mezního mazání na čepech ze slitiny <i>Al-Si</i> [18]
Obr. 5.4.1	Závislost <i>FMEP</i> na teplotě oleje u obou typů uložení klikového mechanismu [20]
Obr. 5.4.2	Navlékání ojnice s klecí ložiska a montáž valivých ložisek [20]
Obr. 5.4.3	Montáž klikového mechanismu a snímek bloku motoru [20]

9 SEZNAM TABULEK

9

- Tab. 4.1.1 Data závodních motorů *NSU* [1]
- Tab. 4.1.2 Podíl ztrát u motocyklového motoru *NSU R 11-52* při otáčkách
10 000 min^{-1} a teplotě klikové skříně 100 °C [1]

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 DVD s kompletní prací